

República Federativa do Brasil  
Ministério do Desenvolvimento, Indústria  
e do Comércio Exterior  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

(11) **PI 0201702-4 B1**

(22) Data de Depósito: 08/05/2002  
(45) Data da Concessão: 20/05/2014  
(RPI 2263)



(51) *Int.Cl.:*  
G01D 5/353  
G02B 6/14

---

(54) Título: **SENSOR DE VARIAÇÃO DE COMPRIMENTO ( STRAIN-GAGE) BASEADO EM FIBRAS ÓPTICAS MULTÍMODO DE PERFIL DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO GRADUAL**

(73) Titular(es): COPPE/UFRJ - Coordenação dos Programas de Pós Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro

(72) Inventor(es): Marcelo Martins Werneck, RICARDO MARQUES RIBEIRO

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para  
"Sensor de variação de comprimento (*strain-gage*) baseado em  
fibras ópticas multimodo de perfil de índice de refração  
gradual"

5 CAMPO TECNICO

Refere-se a presente invenção a um sensor intrínseco  
de variações de comprimento (*strain-gage*) até alguns  
milhares de *micro-strains* ( $\mu\epsilon$ ), com base no uso de fibras  
ópticas multimodo com perfil de índice de refração gradual  
10 em sua direção radial (ou seja, transversal). O comprimento  
típico não-perturbado  $L_0$  da referida fibra multimodo  
servindo como um *strain-gage*, é da ordem de milímetros ou  
centímetros, embora a invenção não se limite a estes  
valores. O arranjo preferencial da invenção opera segundo  
15 um mecanismo de funcionamento baseado no efeito de lente  
com distância de focalização variável que exhibe a referida  
fibra multimodo de índice de refração gradual ao ser  
esticada ou comprimida com relação a  $L_0$ . Nesta última, a  
luz se propaga sob a forma de múltiplos raios seguindo  
20 trajetórias do tipo cíclicas com diferentes amplitudes,  
porém com uma certa periodicidade espacial em comum  
denominada de *pitch*  $P$ . Desta forma, quando um segmento da  
referida fibra multimodo é feito variar de comprimento (a  
fibra é esticada ou contraída)  $|\Delta L_0|$ , por qualquer que seja  
25 o fator físico externo, os raios propagantes sofrerão uma  
defasagem espacial ao longo do eixo axial da fibra. Estando  
a fibra multimodo integrada a um substrato, poder-se-á  
sensoriar variações de comprimento deste último ao se  
conectar um ou dois segmentos de fibra óptica monomodo  
30 servindo simultaneamente como injetora de luz e de filtro  
espacial para a luz transmitida ou a que retorna por  
reflexão.

FUNDAMENTOS DA INVENÇÃO

Com o intuito de melhor fundamentar a presente invenção, descreve-se a seguir algumas de suas motivações.

O sensoriamento qualitativo e quantitativo de grandezas físicas de natureza mecânica como: alongamento  
5 (*strain*), contração (*stress*) e vibração (amplitude e frequência), é fundamental na fase de projeto (maquete) e o monitoramento do estado durante a operação e/ou após reparos e danos naturais de diversas estruturas civis como pontes, viadutos, ferrovias, represas, geradores de  
10 energia, máquinas de grande porte, plataformas de exploração petrolífera, instalações nucleares, dutos, edifícios, estrutura de veículos diversos tais como foguetes, aviões, navios, submarinos, espaçonaves etc. As referidas grandezas físicas a serem sensoriadas podem ser  
15 de caráter estacionário ou quasi-estacionário (DC), ou dinâmicas (AC). Neste último caso, consiste na medida da amplitude e/ou frequência de vibrações que devem ser qualitativamente e quantitativamente medidas nas diversas estruturas conforme mencionado anteriormente.

20 Tensões mecânicas resultantes de esforços aplicados, variações térmicas e processos de corrosão provocados por diversas causas internas e ambientais, implicam numa diminuição gradativa da resistência mecânica de estruturas civis e veículos, principalmente quando se considera os  
25 ambientes agressivos onde a maior parte destas estruturas devem operar.

A monitoração de tensões mecânicas em altas temperaturas pode ser realizada usando técnicas de medidas de *strain* com não-contato, como por exemplo, a  
30 interferometria a laser baseada nas figuras de Moirè. No entanto estes dispositivos são pouco convenientes para medidas de longa duração, principalmente em plantas de geração de energia onde as superfícies são freqüentemente isoladas eletricamente e/ou submetidas a degradação térmica

e/ou eletroquímica. Além disto, as partes a serem monitoradas estão freqüentemente localizadas em regiões onde a inspeção visual é difícil ou impossível. Acrescente-se a estes, o fato de que dispositivos de medidas de *strain* por não-contato são afetados pela temperatura, opacidade e a turbulência da atmosfera do ambiente onde são realizadas as medidas. *Strain-gages* de contato convencionais, como os de resistência elétrica, são bastante conhecidos e utilizados na monitoração de *strain* até temperaturas que podem exceder 370 °C em medidas de longa duração e temperaturas ainda maiores para medidas dinâmicas de curta duração. *Strain-gages* deste tipo são comumente utilizados continuamente em temperaturas até 260 °C e possuem razoável habilidade de se conformarem com a superfície objeto de medida. Alguns *strain-gages* de resistência elétrica como os fabricados pela *Kyowa*, podem ser usados até tais temperaturas, porém possuem menor capacidade de conformação com a topologia da superfície de contato devido à relativa rigidez de seus empacotamentos. No intervalo entre 316 °C e 343 °C, tais *strain-gages* são fabricados com uma liga metálica modificada de níquel-cromo. Esta liga possui boas características de estabilidade (ou deriva) e reprodutibilidade relativas ao pequeno valor de *strain* aparente. A estabilidade do *strain-gage* se refere a sua estabilidade como função da temperatura no regime no qual o efeito de histerese não predomina. Porém, é difícil compensar adequadamente a temperatura (compensação térmica) de tais dispositivos usando técnicas de tratamento térmico. Acima de 343 °C, a liga metálica de que é fabricada o *strain-gage* experimenta uma transição de fase metalúrgica que pode invalidar a compensação térmica resultando num grande deslocamento do zero. No intervalo entre 540 °C e 600 °C é difícil manter a calibração previamente realizada, especialmente com *strain-gages* de resistência elétrica.

Problemas como valores aparentes de *strain*, instabilidade (deriva) e efeitos de histerese surgem devido a ciclos de temperatura. No momento, não se conhece como se realizar medidas de *strain* por longo período de tempo em tais  
5 temperatura elevadas.

Os problemas de instabilidade (deriva) tem sido contornados usando-se *strain-gages* capacitivos. Porém tais dispositivos não são convenientes para medidas dinâmicas acima de 100 Hz de frequência. Embora as características de  
10 baixa instabilidade (deriva) habilitam os *strain-gages* capacitivos para medir mudanças de *strain* em estado estacionário (regime DC), a sua instalação, calibração e a elaboração de documentação relacionada são de alto custo. Apesar de tudo, os *strain-gages* capacitivos são  
15 presentemente os únicos dispositivos de contato usados em medidas de campo para medidas em regime estacionário (DC) em temperaturas acima de 540 °C.

Todos os tipos de *strain-gages* anteriormente descritos possuem em comum, o problema de requerer conexões  
20 elétricas, as quais são freqüentemente difíceis de se implementar, por exemplo, numa planta de geração de energia e em muitas outras situações práticas. Além disto, conexões elétricas podem atuar como antenas, que fazem estes *strain-gages* serem susceptíveis a ruídos eletromagnéticos que  
25 afetam adversamente as medidas. Em contraste, os *strain-gages* a fibra óptica não requerem tais conexões elétricas, são utilizáveis em temperaturas excedendo 370 °C, e de fato podem sobreviver em temperaturas acima de 1.100 °C. A limitação básica consiste no adesivo ou na solda (em fibras  
30 metalizadas) a ser utilizada. No primeiro caso, pode-se contornar com o uso de cerâmicas adesivas para altíssimas temperaturas, como as fabricadas pela *Cotronics*. Além disto, os *strain-gages* a fibra óptica são potencialmente menos invasivos, mais leves, de sensibilidade

potencialmente maior, eletricamente seguros (não possuem poder de ignição), fabricados com matéria-prima mais abundante, possuem um largo espectro de resistência química (com exceção do ácido hidrofúorídrico), podem facilmente  
5 serem multiplexados em grande número, sensoriamto discreto, ou realizar sensoriamto contínuo com o uso frequente de um único equipamento de interrogação e possuem resposta em frequência no domínio elétrico que pode chegar a vários kHz.

10 As condições adversas da natureza e as necessidades impostas para o avanço tecnológico, e o desenvolvimento econômico criam uma série de nichos de aplicações, que propiciam o uso da tecnologia de sensores ópticos em adição ao seu eventual uso rotineiro, de forma a competir  
15 diretamente com os sensores convencionais. De forma genérica, é muitas vezes necessário sensoriar grandezas físicas em ambientes hostis, de difícil acesso e/ou sensíveis. Os referidos ambientes podem ser eletromagneticamente ruidosos, como por exemplo, nas  
20 vizinhanças de altas tensões elétricas ou correntes, fuselagem de um avião, de altas temperaturas e pressões, de atmosfera corrosiva ou explosiva, poços petrolíferos, minas etc. Em todos estes casos, o uso da tecnologia de sensores elétrico/eletrônicos, em particular, os *strain-gages*  
25 convencionais, podem não ser adequados por serem de desempenho insuficiente, recomendado, perigoso ou mesmo impossível. Além do mais, para ambientes hostis ou não, é muitas vezes necessário realizar o sensoriamto de forma remota, ou seja, suficientemente longe do ponto ou pontos  
30 de medida(s), o que se denomina de telemetria. A tecnologia de fibras ópticas para a realização de medidas de *strain*, apresenta intrinsecamente uma série de vantagens, conforme já mencionado como: Imunidade à interferência eletromagnética, não-condutividade elétrica, baixo peso,

pequeno volume, alta sensibilidade, matéria-prima abundante, resistência térmica e química, permite a construção de sistemas de sensoriamento remoto, multiponto e/ou contínuo etc.

- 5        Existem diversas técnicas de modulação para se realizar sensoriamento intrínseco ou extrínseco de variação de comprimento (*strain-gage*) a fibra óptica: Modulação da intensidade, da fase, da polarização, do comprimento de onda, da coerência etc. Estas podem ser combinadas com
- 10 técnicas de multiplexação óptica no tempo, frequência, comprimento de onda, coerência, polarização e combinações destas. Todas estas técnicas combinadas apresentam vantagens e desvantagens relativas e podem ser convenientes conforme as condições de implementação do sistema sensor e
- 15 os seus requisitos de desempenho.

- Os sensores a fibra óptica com base na modulação da amplitude (intensidade) da luz são os mais simples de serem concebidos e construídos, e são os que tiveram maior sucesso comercial até o momento. No entanto, estes sensores
- 20 apresentam limitações, especialmente quanto a sua sensibilidade, que chega a ser cerca de sete ordens de grandeza menor que os sensores interferométricos, conforme é descrito no *Fiberopic Sensor Technology Handbook* escrito por C.M. Davis, E.F. Carome, M.H. Weik, S. Ezekie e R.E.
- 25 Einzig publicado e distribuído pela *Optical Technologies* (OPTECH) em 1986. Um outro inconveniente desta classe de sensores, é a sua dependência da estabilidade temporal e espectral das fontes ópticas utilizadas, bem como da variação das características de propagação ao longo das
- 30 fibras ópticas. Naturalmente que uma série de técnicas vem sendo registradas na literatura com o intuito de contornar estes problemas, conforme é descrito em *Optical Fiber Sensor* editado por Brian Culshaw & John Dakin em 5 volumes em 1989 e 1997 pela Artech House, London, 1989 and 1997.

Como exemplos de sensores de *strain* baseados na modulação da intensidade da luz em fibras ópticas podemos citar: A patente norte-americana de número US 5.020.379 com o título "*Microbend fiber optic strain gage*" concedida em 5 04/06/1991 a John W. Berthold e Stuart E. Reed, onde é descrito o uso do mecanismo de microcurvatura geralmente imposto a uma fibra óptica multimodo com revestimento protetor adequado. A patente norte-americana de número US 5.818.982 com o título, "*Fiber optics sensor based upon* 10 *buckling of a freely suspended lenght of fiber*" concedida em 10/06/1998, a Karl Friedrich Voss e Keith Herbert Wanser, onde é descrito o uso de um elemento sensor consistindo de uma fibra óptica suspensa entre dois pontos onde pelo menos um deles possa se mover (*buckling*) e 15 macrocurvaturas são então aí geradas.

Os sensores interferométricos são naturalmente implementados com base na modulação de fase da luz quer estes sensores sejam ou não à fibra óptica. Os interferômetros são extremamente sensíveis, embora possam 20 ser ruidosos e de construção e processamento de sinais significativamente complexos. Apresentam também o problema da limitação da faixa dinâmica de operação devido ao comportamento cíclico da resposta interferométrica. Como exemplos de sensores interferométricos podemos citar: A 25 patente norte-americana de número US 5.309.772 com o título "*Self-exciting optical strain gage*" concedida em 10/05/1994 a Bruce Hockaday onde é descrito o uso de um mecanismo de sensoriamento extrínseco à fibra óptica com base em um interferômetro de Fabry-Perot. A patente norte-americana de 30 número US 5.477.323 com o título "*Fiber optic strain sensor and read-out system*" concedida em 19/12/1995, a Jeffrey P. Andrews, Joseph A. McClintock e Carl F. Guerci Jr. Onde é descrito o uso de um interferômetro de Mach-Zehnder construído a fibra óptica onde um de seus braços é o



elemento sensor combinado com um interferômetro extrínseco de Fabry-Perot. É também descrito todo o sistema de geração e processamento físico de sinais. A patente norte-americana de número US 5.594.819 com o título "*Field-mountable fiber optic sensors for long term strain monitoring in hostile environments*" concedida em 14/01/1997, a Nadarajah Narendran e Joseph M. Weiss onde é descrito o uso de um mecanismo de sensoriamento extrínseco em fibra óptica com base em um interferômetro de Fabry-Perot onde duas extremidades clivadas desta mesma fibra sejam aderidas em um substrato e interrogado com o uso de luz com grande largura espectral ("luz branca").

Uma variação de um sensor à fibra óptica extrínseco, é descrito na patente norte-americana de número US 4.928.004 com o título, "*Method and apparatus for sensing strain*" concedida em 22/05/1990, a Bernd D. Zimmermann, Richard O. Claus e Kent A. Murphy onde é descrito o uso de um mecanismo onde o atraso temporal relativo de um pulso óptico curto entre as duas reflexões nas extremidades de uma guia óptica extrínseca é medido devido à uma variação de comprimento da guia.

A modulação em comprimento de onda tem sido também utilizada no sensoriamento de *strain*, conforme é documentado na patente norte-americana de número US 4.806.012 com o título, "*Distributed, spatially resolving optical fiber strain gauge*" concedida em 21/02/1989, a Gerald Meltz, William H. Glenn e Elias Snitzer onde é descrito o uso de redes de Bragg gravadas em fibras ópticas. A técnica é bastante poderosa, embora apresente alguns inconvenientes, como por exemplo: Sensibilidade com relação a variações de temperatura, o que requer o uso de técnicas de compensação ou de discriminação de sinais. A fabricação das redes de Bragg requer equipamentos de alto custo e apresentam relativa complexidade e certas sutilezas

em seu processo de manufatura. Algumas técnicas de fabricação de redes de Bragg, requerem a retirada do encapamento da fibra, fato este que as fragilizam mesmo que sejam mecanicamente reforçadas após o processo de fabricação. A demodulação dos resultados de medidas das grandezas físicas codificados em comprimento de onda, é uma tarefa não-trivial e requer equipamentos de razoável complexidade e de alto custo.

#### SUMÁRIO DA INVENÇÃO

10 O objetivo central da presente invenção é a de medir pequenas variações de comprimento (*strain*, *stress* e vibrações), tipicamente mas não exclusivamente iguais ou menores do que 5.000  $\mu\text{e}$ , que são transmitidas por um substrato sólido de natureza material qualquer a um ou mais segmentos de fibras ópticas multimodo de perfil gradual de índice de refração. Em consequência disto, torna-se possível medir também outras grandezas físicas como pressão (axial e hidrostática), temperatura, campos elétricos e magnéticos (amplitude e frequência).

20 Uma primeira concretização da presente invenção diz respeito à necessidade de se medir o alongamento (*strain*), contração (*stress*) ou vibração (amplitude e frequência) de um substrato, o que requer uma implementação física e é caracterizada pelas etapas de:

25 (a) Injetar luz, ou sinal de prova em uma fibra óptica monomodo;

(b) Conectar a fibra óptica monomodo a um segmento de fibra óptica multimodo de perfil gradual de índice de refração;

(c) Imobilizar um certo comprimento da fibra óptica multimodo na superfície de um substrato sólido de natureza qualquer, de forma que fique esticada, e que quaisquer perturbações mecânicas que ocorram no plano do substrato possam ser transmitidas à fibra de forma que seu comprimento seja alterado;

- (d) Se o invento operar no modo reflexivo, permitir que uma fração da luz propagante pela fibra multimodo seja refletida a partir da extremidade desta e seja em parte reinjetada na fibra monomodo;
- 5 (e) Se o invento operar no modo transmissivo, conectar uma fibra óptica monomodo na outra extremidade da fibra multimodo de modo que a luz passe a se propagar pela primeira;
- (f) Se o invento operar no modo reflexivo, o sinal óptico
- 10 modulado pela variação de comprimento ou vibração do substrato, deverá ser detectado e convenientemente demodulado depois de ter sido reinjetado e se propagado na fibra monomodo;
- (g) Se o invento operar no modo transmissivo, o sinal
- 15 óptico modulado pela variação de comprimento ou vibração do substrato, deverá ser detectado e convenientemente demodulado depois de ser injetado e se propagado na segunda fibra monomodo;

Uma segunda concretização da presente invenção diz

20 respeito à necessidade de se medir a pressão hidrostática, o que requer uma implementação física que é caracterizada pelas etapas de:

- (a) Injetar luz, ou sinal de prova em uma fibra óptica monomodo;
- 25 (b) Conectar a fibra óptica monomodo a um segmento de fibra óptica multimodo de perfil gradual de índice de refração;
- (c) Imobilizar um certo comprimento da fibra óptica multimodo, de forma que fique esticada conforme o dispositivo mecânico transdutor descrito pela patente
- 30 norte-americana de número US 5.844.667 com o título de "*Fiber optic pressure sensor with passive temperature compensation*" concedida em 01/12/1998 a Robert J. Maron onde variações de pressão hidrostática são convenientemente transformadas em variação de comprimento (*strain*) caso a

fibra multimodo de índice gradual seja imobilizada dentro do referido dispositivo;

(d) Se o invento operar no modo reflexivo, permitir que uma fração da luz propagante pela fibra multimodo seja  
5 refletida a partir da extremidade desta e seja em parte reinjetada na fibra monomodo;

(e) Se o invento operar no modo transmissivo, conectar uma fibra óptica monomodo na outra extremidade da fibra multimodo de modo que a luz passe a se propagar pela  
10 primeira;

(f) Se o invento operar no modo reflexivo, o sinal óptico modulado pela variação de comprimento da fibra multimodo, deverá ser detectado e convenientemente demodulado depois de ser reinjetado e se propagado na fibra monomodo;

(g) Se o invento operar no modo transmissivo, o sinal óptico modulado pela variação de comprimento da fibra multimodo, deverá ser detectado e convenientemente demodulado depois de ser injetado e se propagado na segunda  
15 fibra monomodo;

20 Uma terceira concretização da presente invenção diz respeito à necessidade de se medir a temperatura, o que requer uma implementação física que é caracterizada pelas etapas de:

(a) Injetar luz, ou sinal de prova em uma fibra óptica  
25 monomodo;

(b) Conectar a fibra óptica monomodo a um segmento de fibra óptica multimodo de perfil gradual de índice de refração;

(c) Imobilizar um certo comprimento da fibra óptica multimodo na superfície de um substrato sólido de natureza  
30 metálica do qual se quer medir a temperatura, de forma que a fibra multimodo fique sempre esticada, e que as variações no comprimento da mesma ocorram devido a dilatação ou contração térmica sofrida pelo referido substrato;

(d) Se o invento operar no modo reflexivo, permitir que uma

fração da luz propagante pela fibra multimodo seja refletida a partir da extremidade desta e seja em parte reinjetada na fibra monomodo;

(e) Se o invento operar no modo transmissivo, conectar uma  
5 fibra óptica monomodo na outra extremidade da fibra multimodo de modo que a luz passe a se propagar pela primeira;

(f) Se o invento operar no modo reflexivo, o sinal óptico modulado pela dilatação ou contração térmica do substrato,  
10 deverá ser detectado e convenientemente demodulado depois de ser reinjetado e se propagado na fibra monomodo;

(g) Se o invento operar no modo transmissivo, o sinal óptico modulado pela dilatação ou contração térmica do substrato, deverá ser detectado e convenientemente  
15 demodulado depois de ser injetado e se propagado na segunda fibra monomodo;

Uma quarta concretização da presente invenção diz respeito à necessidade de se medir a magnitude DC ou AC de campos elétricos (voltagem ou tensão elétrica), o que  
20 requer uma implementação física e é caracterizada pelas etapas de:

(a) Injetar luz, ou sinal de prova em uma fibra óptica monomodo;

(b) Conectar a fibra óptica monomodo a um segmento de fibra  
25 óptica multimodo de perfil gradual de índice de refração;

(c) Imobilizar um certo comprimento da fibra óptica multimodo na superfície de um substrato de natureza piezoelétrica, de forma que fique esticada, e que se houver a presença de campo elétrico o seu comprimento seja  
30 alterado;

(d) Se o invento operar no modo reflexivo, permitir que uma fração da luz propagante pela fibra multimodo seja refletida a partir da extremidade desta e seja em parte reinjetada na fibra monomodo;

- (e) Se o invento operar no modo transmissivo, conectar uma fibra óptica monomodo na outra extremidade da fibra multimodo de modo que a luz passe a se propagar pela primeira;
- 5 (f) Se o invento operar no modo reflexivo, o sinal óptico modulado pela variação de comprimento ou vibração do substrato, deverá ser detectado e convenientemente demodulado depois de ser reinjetado e se propagado na fibra monomodo;
- 10 (g) Se o invento operar no modo transmissivo, o sinal óptico modulado pela variação de comprimento ou vibração do substrato, deverá ser detectado e convenientemente demodulado depois de ser injetado e se propagado na segunda fibra monomodo;
- 15 Uma quinta concretização da presente invenção diz respeito à necessidade de se medir a magnitude DC ou AC de campos magnéticos (corrente elétrica), o que requer uma implementação física e é caracterizada pelas etapas de:
- (a) Injetar luz, ou sinal de prova em uma fibra óptica
- 20 monomodo;
- (b) Conectar a fibra óptica monomodo a um segmento de fibra óptica multimodo de perfil gradual de índice de refração;
- (c) Imobilizar um certo comprimento da fibra óptica multimodo na superfície de um substrato de natureza
- 25 magnetostrictiva, de forma que fique esticada, e que se houver a presença de campo magnético seu comprimento seja alterado;
- (d) Se o invento operar no modo reflexivo, permitir que uma fração da luz propagante pela fibra multimodo seja
- 30 refletida a partir da extremidade desta e seja em parte reinjetada na fibra monomodo;
- (e) Se o invento operar no modo transmissivo, conectar uma fibra óptica monomodo na outra extremidade da fibra multimodo de modo que a luz passe a se propagar pela

primeira;

(f) Se o invento operar no modo reflexivo, o sinal óptico modulado pela variação de comprimento ou vibração do substrato, deverá ser detectado e convenientemente  
5 demodulado depois de ser reinjetado e se propagado na fibra monomodo;

(g) Se o invento operar no modo transmissivo, o sinal óptico modulado pela variação de comprimento ou vibração do substrato, deverá ser detectado e convenientemente  
10 demodulado depois de ser injetado e se propagado na segunda fibra monomodo;

#### BREVE DESCRIÇÃO DAS FIGURAS

FIGURA 1: Mostra uma arquitetura básica preferencial do sistema sensor integrado com o substrato de superfície  
15 plana, onde a fibra multimodo é esticada e imobilizada em dois pontos, opera em modo reflexivo, porém com o substrato sendo mostrado em vista lateral.

FIGURA 2: Mostra uma arquitetura básica preferencial do sistema sensor integrado com o substrato de superfície  
20 plana, onde a fibra multimodo é esticada e imobilizado em dois pontos, opera em modo reflexivo, porém com o substrato sendo mostrado em vista superior.

FIGURA 3: Mostra a junção (emenda) da fibra óptica monomodo com uma fibra óptica multimodo de índice gradual esticada e  
25 imobilizada em dois pontos e, por conseguinte, o mecanismo básico de funcionamento do sensor que opera em modo reflexivo.

FIGURA 4: Mostra em vista lateral uma arquitetura básica preferencial do sistema sensor integrado com o substrato de  
30 superfície plana, onde a fibra multimodo é esticada e imobilizada em dois pontos, operando em modo transmissivo.

FIGURA 5: Mostra em vista superior uma arquitetura básica preferencial do sistema sensor integrado com o substrato de superfície plana, onde a fibra multimodo é esticada e

imobilizada em dois pontos, operando em modo transmissivo.

FIGURA 6: Mostra as junções (emendas) da fibra óptica monomodo com uma fibra óptica multimodo índice gradual esticada e imobilizada em dois pontos, e desta última com  
5 uma segunda fibra óptica monomodo, e, por conseguinte, o mecanismo básico de funcionamento do sensor que opera em modo transmissivo.

FIGURA 7: Mostra em vista superior uma arquitetura básica preferencial do sistema sensor integrado em um substrato de  
10 superfície plana, onde a fibra multimodo é esticada e imobilizada ao longo de um segmento, operando em modo reflexivo.

FIGURA 8: Mostra em vista superior uma arquitetura básica preferencial do sistema sensor integrado em um substrato de  
15 superfície plana, onde a fibra multimodo é esticada e imobilizada ao longo de um segmento, operando em modo transmissivo.

FIGURA 9: Mostra em vista superior uma arquitetura preferencial do sistema sensor, onde três segmentos da  
20 mesma fibra multimodo de índice gradual estão esticadas e imobilizadas em dois pontos, operando em modo reflexivo.

FIGURA 10: Mostra em vista superior uma arquitetura preferencial do sistema sensor, onde três segmentos da  
mesma fibra multimodo de índice gradual estão esticadas e  
25 imobilizadas em dois pontos, operando em modo transmissivo.

FIGURA 11: Mostra em vista superior uma arquitetura preferencial do sistema sensor onde três segmentos da mesma  
fibra multimodo de índice gradual estão esticadas e  
imobilizadas ao longo de um certo comprimento, operando em  
30 modo reflexivo.

FIGURA 12: Mostra em vista superior uma arquitetura preferencial do sistema sensor onde três segmentos da mesma  
fibra multimodo de índice gradual estão esticadas e  
imobilizadas ao longo de um certo comprimento, operando em



modo transmissivo.

FIGURA 13: Mostra uma arquitetura preferencial do sistema sensor onde um segmento de fibra óptica multimodo de índice gradual é coberta em torno de sua superfície externa com  
5 uma ou mais camadas metálicas, de material piezoelétrico ou magnetostrictivo, operando em modo reflexivo.

FIGURA 14: Mostra uma arquitetura preferencial do sistema sensor onde um segmento de fibra óptica multimodo de índice gradual é coberta em torno de sua superfície externa com  
10 uma ou mais camadas metálicas, de material piezoelétrico ou magnetostrictivo, operando em modo transmissivo.

FIGURA 15: Secção reta de uma fibra multimodo de índice gradual coberta em torno de sua superfície externa com uma ou mais camadas metálicas, de material piezoelétrico ou  
15 magnetostrictivo.

FIGURA 16: Mostra um resultado de medida da variação de comprimento (alongamento/contração) de uma fibra óptica multimodo de índice gradual quando fazendo parte da arquitetura do invento conforme mostrado na FIGURA 1 ou 2  
20 (modo reflexivo) onde a fibra multimodo é gradualmente esticada e utilizou-se comprimento de onda em 1310 nm para a interrogação óptica. O sinal de resposta óptica exibe um comportamento linear entre 0 e  $\sim 4.500 \mu\epsilon$ .

FIGURA 17: Mostra um resultado de medida da variação de comprimento (alongamento/contração) de uma fibra óptica multimodo de índice gradual quando fazendo parte da arquitetura do invento conforme mostrado na FIGURA 1 ou 2  
25 (modo reflexivo) onde a fibra multimodo é gradualmente esticada e utilizou-se comprimento de onda em 1310 nm para a interrogação óptica.  
30

FIGURA 17a: Mostra apenas o comportamento linear entre 0 e  $\sim 2.700 \mu\epsilon$  observado na FIGURA 17.

FIGURA 18: Mostra comparativamente dois resultados de medidas da variação de comprimento (alongamento/contração)

de uma fibra óptica multimodo de índice gradual quando fazendo parte da arquitetura do invento conforme mostrado na FIGURA 1 ou 2 (modo reflexivo) onde a fibra multimodo é gradualmente esticada e utilizou-se comprimentos de onda em

5 1310 e 1550 nm para a interrogação óptica.

FIGURA 19: Mostra um resultado de medida da variação de comprimento (alongamento/contração) de uma fibra óptica multimodo de índice gradual quando fazendo parte da arquitetura do invento conforme mostrado na FIGURA 1 ou 2

10 (modo reflexivo) onde a fibra multimodo é gradualmente esticada e utilizou-se comprimento de onda em 1550 nm para a interrogação óptica.

FIGURA 20: Mostra um resultado de medida da variação de comprimento (alongamento/contração) de uma fibra óptica multimodo de índice gradual quando fazendo parte da arquitetura do invento conforme mostrado na FIGURA 9 (modo reflexivo) onde dois segmentos da fibra multimodo são gradualmente esticados e utilizou-se comprimento de onda em

15 1310 nm para a interrogação óptica.

FIGURA 20a: Mostra apenas o comportamento linear da resposta óptica entre 1.100 e 2.700  $\mu\text{e}$  conforme observado na FIGURA 20.

20

FIGURA 21: Mostra um resultado de medida da variação de comprimento (alongamento/contração) de uma fibra óptica multimodo de índice gradual quando fazendo parte da arquitetura do invento conforme mostrado na FIGURA 9 (modo reflexivo) onde dois segmentos da fibra multimodo são gradualmente esticados e utilizou-se comprimento de onda em

25 1310 nm para a interrogação óptica. É mostrado o comportamento linear em uma faixa de  $\sim 1.500 \mu\text{e}$ .

30

FIGURA 22: Mostra um resultado de medida da variação de comprimento (alongamento/contração) de uma fibra óptica multimodo de índice gradual quando fazendo parte da arquitetura do invento conforme mostrado na FIGURA 9 (modo

reflexivo) onde dois segmentos da fibra multimodo são gradualmente esticados e utilizou-se comprimento de onda em 1550 nm para a interrogação óptica.

FIGURA 23: Mostra esquematicamente um resultado de medida da temperatura onde o invento é implementado conforme a arquitetura mostrada na FIGURA 4 ou 5 (modo transmissivo), o substrato é de alumínio e utilizou-se comprimento de onda em 1310 nm para a interrogação óptica.

#### DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

Com o objetivo de solucionar boa parte dos inconvenientes e requerimentos existentes no estado da técnica, desenvolveu-se a presente invenção que consiste em um sistema de sensoriamento intrínseco a fibra óptica baseado numa técnica onde a luz é modulada em seu padrão de guiamento na direção axial. Desta forma, o comprimento linear da guia, ou seja, da fibra óptica multimodo de índice gradual, é modulado devido à atuação da grandeza física em questão. A referida grandeza física consiste em variações mecânicas de comprimento (*strain*, *stress* e vibrações) que são transmitidas a fibra multimodo de índice gradual quando o invento é implementado na sua forma fundamental e preferencial. Entre as vantagens exibidas pelo presente invento, podemos citar: Funciona baseado na modulação da intensidade óptica, cuja referência pode ser obtida com o uso de diversas técnicas descritas na literatura, e em particular, o dispositivo aqui objeto de invenção pode ser opticamente interrogado com o uso de um refletômetro operando no domínio do tempo (um OTDR comercial, por exemplo). Desta maneira, o sinal óptico de referência é naturalmente extraído a partir do retroespalhamento de Rayleigh gerado à medida que os pulsos de interrogação se propagam ao longo da fibra óptica. O sensor é de natureza intrínseca, ou seja, a luz não é extraída da fibra para ser modulada pelo mensurando. Pouca

sensibilidade térmica da fibra multimodo de índice gradual de sílica, ou seja, o seu coeficiente de dilatação térmica ( $5,2 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ ) é bem menor do que a maioria dos materiais sólidos. O dispositivo pode ser facilmente multiplexado  
5 espacialmente de forma a se realizar sensoriamento multiponto com a utilização de uma única fibra óptica de barramento. Fácil e barato de se fabricar, lembrando que fibras monomodo *standard* (índice degrau) e as fibras multimodo de índice gradual parabólico estão disponíveis  
10 comercialmente. Excelente sensibilidade óptica em função do *strain*, conforme já demonstrado, que pode ainda ser melhorada otimizando-se os parâmetros materiais e geométricos do dispositivo. Faixa dinâmica de operação demonstrada compatível para utilização prática, que também  
15 pode ser melhorada otimizando-se os parâmetros materiais e geométricos do dispositivo. Permite realizar demodulação simples e de relativo baixo custo. Contém ainda todas as vantagens intrínsecas pelo fato de ser um sensor a fibra óptica, inclusive a robustez, já que as fibras ópticas  
20 envolvidas na construção do invento podem ser reforçadas para que possam sobreviver a aplicação de tensões mecânicas e/ou a ambientes agressivos.

Algumas patentes concedidas, referem-se a dispositivos formados pela conexão entre diferentes tipos  
25 de fibras ópticas, especialmente envolvendo fibras multimodo de índice gradual. No entanto, nenhuma destas patentes descreve um invento igual ou mesmo similar ao que é aqui descrito. Como exemplos, pode-se verificar as patentes norte-americanas de número US 4.201.447 com o  
30 título "*Termination for graded index fiber*", concedida em 06/05/1980 a George H. B. Thompson e Peter R. Selway, US 4.701.011 com o título "*Multimode fiber-lens optical coupler*", concedida em 20/10/1987 a William L. Emkey e Jack A. Curtis e US 5.457.759 com o título "*Monolithic optical*

system and method of making same including improved coupling means between an optical fiber and a phototransducer" concedida em 10/10/1995 a Ndiata Kalonji e Jack Semo. Todas estas patentes, referem-se a dispositivos aplicados à interconexão óptica entre fibras e componentes optoeletrônicos como fontes ópticas e fotodetectores.

O invento aqui descrito pode com pequenas modificações, ser adaptado para se constituir em um sensor de pressão, temperatura ou campos eletromagnéticos (campos elétricos ou campos magnéticos). O invento foi originalmente concebido visando aplicações não só usuais, como também para ser utilizado em ambientes e condições adversas ao uso dos sensores convencionais.

Para detalhar o funcionamento da invenção em modo reflexivo, serão utilizadas as FIGURAS 1, 2 e 3. As FIGURAS 1 e 2 referem-se ao diagrama da arquitetura preferencial da presente invenção de forma que a FIGURA 1 é uma vista em perspectiva lateral e a FIGURA 2 em perspectiva superior. A FIGURA 3 é uma vista ampliada da parte tracejada das FIGURAS 1 e 2, de forma a ilustrar mais clara e detalhadamente o princípio de funcionamento do sensor aqui objeto de invenção.

As FIGURAS 1 e 2 mostram o diagrama da arquitetura preferencial da presente invenção onde (1) é a luz injetada no dispositivo. A luz injetada (1) poderá estar em regime contínuo, pulsado ou modulado, possuindo comprimento de onda central tipicamente no visível ou infravermelho próximo (0,4 a 1,7  $\mu\text{m}$ ) e largura espectral arbitrária. Sua função é a de interrogar o elemento sensor, e desta forma adquirir modulação na intensidade óptica devido a variação de comprimento (*strain*) do referido elemento sensor. A fonte luminosa que gera a luz (1), consiste tipicamente, mas não exclusivamente, em um laser (de banda espectral estreita) ou LED (banda espectral larga) semiconductor. O

sinal óptico de interrogação (1) deve então ser injetado em uma fibra óptica monomodo (2) cuja função em primeiro lugar, é a de conduzir a luz (1) até a região onde será feito o sensoriamento. A fibra monomodo (2) pode ser uma

5 fibra de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) padrão de 9/125  $\mu\text{m}$  das Telecomunicações, embora a invenção não se limite a este tipo de fibra. A fibra monomodo (2) embora seja preferencialmente fabricada com base na sílica, não se limita no entanto a este material como matéria-prima,

10 podendo ser fabricada, por exemplo, com polímeros como o poli-metyl-metacrilato (PMMA) ou outros materiais. Não há restrições quanto ao comprimento da fibra monomodo (2), exceto pela atenuação óptica total que ela impõe à propagação da luz (1). Desta forma, o sensoriamento a ser

15 realizado pelo invento poderá ser local ou remoto. A emenda ou conexão (3) consiste na continuidade óptica que pode ser obtida através da emenda por fusão ou conexão mecânica (provisória ou permanente) entre a fibra óptica monomodo (2) e uma fibra multimodo de índice gradual (4) que se

20 segue, gerando então uma interface óptica (3). A emenda permanente (3) pode ser preferencialmente, mas não exclusivamente feita por fusão com arco elétrico com o uso de equipamentos comercialmente disponíveis, devido à estabilidade conferida por esta técnica caso sejam

25 utilizadas fibras ópticas de sílica. Pode-se também emendar as fibras ópticas (2) e (4) por emenda mecânica permanente com o uso de adesivo curável por exposição à luz ultravioleta. Caso as fibras ópticas (2) e (4) utilizadas sejam fabricadas a partir de polímeros, pode-se realizar a

30 emenda permanente com o uso de solventes orgânicos adesivos ou por ultra-som. Alternativamente, a emenda (3) poderá ser implementada com o uso de conectores opto-mecânicos não-permanentes também disponíveis comercialmente, tanto para fibras ópticas de sílica quanto para as de polímero. A

fibra multimodo (4) conectada a fibra monomodo (2) é a do tipo de perfil radial de índice de refração gradual e as setas nas FIGURAS 1 e 2 apontam para as regiões onde a fibra não está imobilizada nem esticada. A fibra multimodo (4) pode ser uma fibra padrão de 50/125 ou 62,5/125  $\mu\text{m}$  de Telecomunicações cuja característica é a de minimizar os efeitos da dispersão modal, embora a invenção não se limite a este tipo de fibra multimodo. A fibra multimodo de índice gradual (4) embora seja preferencialmente fabricada com base na sílica ( $\text{SiO}_2$ ), não se limita, no entanto, a este material como matéria-prima, podendo ser fabricada por exemplo com polímeros como o poly-metil-metacrilato (PMMA), polímeros fluoretados de última geração (*Perfluorinated Graded-Index Polymer Optical Fiber*) ou outros materiais poliméricos. Não há em princípio restrições quanto ao comprimento da fibra multimodo (4), exceto pelo fato de que não é recomendável ser demasiadamente longa, o que poderia acarretar instabilidade no desempenho do dispositivo, nem demasiadamente curta o que inviabilizaria a sua imobilização em um segmento esticado de comprimento inicial  $L_0$  ao longo de um substrato sólido de superfície plana (5) de natureza material qualquer, do qual se deseja medir e monitorar variações de comprimento  $|\Delta L_0|$ . A fibra multimodo (4) deve então ser adequadamente esticada e imobilizada em dois pontos (6), desta forma produzindo um segmento esticado de fibra multimodo (7) com comprimento  $L_0$  antes de sofrer qualquer variação de comprimento imposta pelo substrato plano (5). Deve-se observar que o segmento de fibra multimodo (7) esticada e imobilizada em dois pontos (6) consiste na mesma fibra óptica não-esticada nem imobilizada (4). Os pontos de imobilização (6) da fibra multimodo (4) sobre o plano do substrato (5) podem ser obtidos com o uso de adesivos adequados como, por exemplo,

o Kyowa CC-33A ou PC-12, ou o Epotek OG-142, todos eles resistindo temperaturas superiores a 100 °C. Pode-se também utilizar adesivos fabricados pela *Measurement Group* ou cerâmicas adesivas para altíssimas temperaturas como as

5 fabricadas pela *Cotronics*. Alternativamente, a fibra multimodo (4) (com o seu segmento esticado (7)) poderá ser do tipo metalizada em torno de sua superfície externa, e então poderá ser imobilizada com o uso de um adesivo óptico, conforme exemplificado anteriormente, ou ser

10 diretamente soldada no substrato (5) caso este seja de natureza metálica. Estas técnicas de imobilização da fibra multimodo (4) em um segmento esticado (7) são exemplos e a presente invenção não se limita a estas. O segmento de fibra multimodo (7) deve ser mantido esticado qualquer que

15 seja a temperatura em que o invento esteja operando. Nestas condições, a luz (1) após se propagar ao longo da fibra monomodo (2), será injetada através da conexão (3) na fibra multimodo de índice gradual (4) não-esticada e desta forma irá se propagar através da porção esticada (7) da fibra

20 multimodo que se encontra imobilizada em um comprimento inicial  $L_0$  ao longo do substrato plano (5) quando este último não sofreu ainda qualquer variação de comprimento. Devido a uma causa física qualquer (efeito mecânico, térmico ou a ação de campos eletromagnéticos), o substrato

25 plano (5) poderá sofrer variações de comprimento  $|\Delta L_0|$  que serão totalmente transmitidas ao longo da fibra multimodo (7), quer estes sejam alongamentos quasi-estacionários (*strain*) onde a fibra multimodo (7) torna-se ainda mais esticada de um valor  $+\Delta L_0$ , contrações quasi-estacionárias

30 (*stress*) onde a fibra multimodo (7) torna-se menos esticada de um valor  $-\Delta L_0$ , ou vibrações onde a fibra multimodo (7) adquire um movimento oscilante no intervalo  $[L_0 - \Delta L_0, L_0 + \Delta L_0]$  com frequência ou composição de frequências igual ao



do próprio movimento vibratório. A resposta em frequências do invento fica limitada à resposta do sistema mecânico composto pelo substrato (5), material adesivo ou solda utilizado nos pontos de imobilização (6) e a fibra multimodo (7), de forma que valores típicos vão a centenas de kHz não sendo no entanto limitadas a estes. A luz (1) sofrerá um defasamento (modulação) no seu padrão espacial de guiamento óptico ao se propagar através da fibra multimodo (7) que tenha sofrido alguma variação de comprimento  $|\Delta L_0|$  conforme será mais detalhadamente explicado logo adiante. No entanto, deve-se aqui mencionar, que o mecanismo de modulação imposto pela variação de comprimento  $|\Delta L_0|$  da fibra multimodo (7), por si só, não implica na atenuação óptica do sinal de interrogação (1). A luz (1) continua a se propagar através do segmento (4) de fibra multimodo não-esticada até incidir e ser refletida na extremidade clivada (8) da fibra multimodo (4). A extremidade clivada (8) poderá estar pura, ou seja, constituir-se simplesmente numa interface fibra/ar, neste caso apenas uma fração (1') da luz (1) retorna por reflexão. Esta fração (1') será da ordem de 4% da potência óptica incidente da luz (1) caso a fibra multimodo (4) seja fabricada com sílica ou PMMA. A extremidade clivada (8) poderá ter integrada a si uma ou mais camadas finas ou espessas de algum material com alto poder de reflexão com por exemplo um filme metálico. Este filme metálico poderá ser de ouro devido a sua resistência à oxidação, embora o invento não se limite a este material. Se o objetivo for o de diminuir a potência óptica refletida (1') com referência ao que é obtido com a interface fibra/ar (~ 4%), torna-se necessário integrar uma camada de material de índice de refração de valor intermediário entre o ar e o material com o qual é fabricada a fibra multimodo (4), como por exemplo, depositar um filme fino de  $MgF_2$ , cujo índice de refração de

1,38 é adequado para interfaces sílica/ar ou PMMA/ar, ou então que a extremidade clivada (8) da fibra multimodo (4) fique imersa num meio material líquido com o referido índice de refração intermediário. A companhia *Cargille* comercializa líquidos ópticos com estabilidade química adequada ao invento, em uma grande variedade de índices de refração, cujo valor a escolher dependerá da fração de potência óptica da luz (1') que se deseje ser refletida pela extremidade clivada (8). O processo de clivagem utilizado para se obter a extremidade (8) visa a preferencialmente produzir uma extremidade de fibra multimodo (4) plana e com plano perpendicular ao seu eixo axial. Para o processo de clivagem, pode-se utilizar clivadores de precisão disponíveis comercialmente como os fabricados pelas companhias Fujikura ou York, por exemplo. Alternativamente, pode-se realizar a clivagem manualmente com o auxílio de uma lâmina de diamante ou alumina, por exemplo. A extremidade clivada (8) da fibra multimodo (4) também poderá ser adicionalmente polida com o uso de lixas com granuloses micrométricas e sub-micrométricas, de forma análoga a que se usa na tecnologia de conectorização de fibras ópticas de sílica ou de polímero. A luz (1) após ser parcialmente refletida como sendo a fração (1') na extremidade clivada (8), passa a se propagar no sentido inverso ao do anteriormente relatado. Portanto, a luz (1) propaga-se novamente através da fibra multimodo (4) sob a forma da fração (1') e passa novamente pelo segmento esticado de fibra multimodo (7) que sofreu variação de comprimento  $|\Delta L_0|$ . Desta forma, a luz (1') sofre um defasamento espacial adicional conforme será mais detalhadamente explicado adiante. Deve-se aqui enfatizar, que a fibra multimodo (4) deve ser suficientemente curta para que uma mesma variação de comprimento da fibra multimodo (7) seja experimentada pela luz (1), e sua fração

(1'), ao propagar-se nos dois sentidos, o que é garantido pelo grande valor da velocidade de propagação da luz em fibras ópticas ( $\sim 200.000$  km/s). A luz (1') modulada, por conseguinte, propaga-se através do segmento não-esticado da fibra multimodo (4) e é reinjetada na fibra monomodo (2) após atravessar a emenda (3). Nesta etapa, a modulação na fase espacial de guiamento da luz (1'), é convertida na modulação de sua intensidade e esta será uma função da variação de comprimento  $|\Delta L_0|$  da fibra multimodo (7). Nesta etapa, inevitavelmente, haverá uma atenuação óptica no processo de conversão da luz (1') para a luz modulada na intensidade (9). A luz (9) então modulada na intensidade com relação à luz injetada (1), e sua fração (1'), emerge do dispositivo e segue para a detecção e processamentos subsequentes. A clivagem que produz a extremidade (8), seja qual for o método utilizado, permite definir a fase espacial com que a luz refletida (1') incide na interface (3) onde então ocorre uma conversão para modulação na intensidade. A referida clivagem pode também ser feita em ângulo, procedimento este que irá também modificar a fase espacial do feixe de raios componentes da luz (1') que é refletido pela extremidade clivada (8) da fibra multimodo (4).

A FIGURA 3 mostra um diagrama em forma ampliada da região cercada por um traçado pontilhado nas FIGURAS 1 e 2 compreendendo a fibra óptica monomodo (2), a interface de conexão (3) e a fibra óptica multimodo de índice gradual (4) e o seu segmento esticado e imobilizado (7) em dois pontos (6), com o intuito de auxiliar na explanação mais detalhada do mecanismo fundamental de funcionamento do invento. Desta forma, a luz de interrogação (1) é injetada no núcleo (10) da fibra óptica monomodo (2) que é também composta pela casca (11) para garantir o guiamento óptico. A luz (1) após propagar-se pela fibra monomodo (2), incide

na interface de conexão (3) a partir de onde é injetada na fibra multimodo de índice gradual (4). A referida injeção da luz (1), é realizada mais especificamente na interface (12) entre o núcleo (10) da fibra monomodo (2) e o núcleo (13) da fibra multimodo de índice gradual (4) composta também da casca (14) que garante o guiamento óptico. O diâmetro do núcleo (13) da fibra multimodo (4) é tipicamente, mas não exclusivamente, 5-20 vezes maior que o diâmetro do núcleo (10) da fibra monomodo (2). Desta forma, a interface (12) desempenha o papel simultâneo de injetora da luz (1) proveniente da fibra monomodo (2) e de filtro espacial da luz refletida (1') proveniente da fibra multimodo (4), como resultado fazendo a conversão para a luz (9) modulada na intensidade óptica conforme ficará mais claro logo a seguir. A luz (1), é então injetada de forma estável a partir da interface (12) no núcleo (13) da fibra multimodo (4), formando um cone luminoso (15) com um ângulo sólido máximo  $\theta_{\text{máx}}$  determinado pela abertura numérica  $NA = n_M \sin \theta_{\text{máx}}$ , onde  $n_M$  é o índice de refração médio que o cone luminoso (15) da luz (1) experimenta ao ser injetada no núcleo (13) da fibra multimodo (4). A abertura numérica  $NA$  do cone luminoso (15) é tipicamente, mas não exclusivamente, de valor numérico  $NA < 0,10$ , ou seja, o de uma fibra monomodo 9/125  $\mu\text{m}$  padrão de Telecomunicações o que fornece um ângulo sólido típico de injeção de valor numérico  $\theta_{\text{máx}} \approx 4^\circ$ . O cone luminoso (15) injetado a partir de (12) propaga-se ao longo do núcleo (13) da fibra multimodo (4), ao mesmo tempo que diverge da referida área circular de injeção (12). A fibra óptica multimodo (4) é a do tipo perfil gradual aproximadamente do tipo parabólico quanto à distribuição radial do seu índice de refração, o que pode ser descrito pela equação [1],

$$n(r) = n_0 \sqrt{1 - g^2 r^2} \quad [1]$$

onde "g" designa o parâmetro de focalização, "r" é a coordenada radial, "n<sub>0</sub>" e "a" referem-se respectivamente ao índice de refração no centro e ao raio do núcleo (13). Devido ao fato de que o índice de refração n<sub>0</sub> possui valor  
 5 bastante próximo do índice de refração da casca, a equação [1] pode ser aproximada para:

$$n(r) = n_0 \left( 1 - \frac{g}{2} r^2 \right) \quad [2].$$

A fibra multimodo de índice gradual parabólico (4) possui tipicamente, mas não exclusivamente uma abertura numérica  
 10 NA situada no intervalo numérico NA = 0,25-0,30. O expoente de valor numérico 2 que descreve funcionalmente o perfil de índice de refração n(r) mostrado na equação [1] ou [2] deve na realidade ser finamente ajustado em torno do valor 2 em função, dentre outros fatores, do comprimento de onda da  
 15 luz propagante (1). A razão disto é a de minimizar a dispersão de perfil de forma que o efeito da dispersão modal fique em um valor mínimo para um certo comprimento de onda operacional. Para simplificar a explicação subsequente, far-se-á uma restrição a uma descrição baseada  
 20 apenas nos princípios da Óptica Geométrica, que se mostra suficiente para o presente propósito. A combinação do cone de injeção de luz (15) e o perfil de índice de refração gradual parabólico [1] ou [2] da fibra multimodo (4), define uma área de secção reta máxima do campo luminoso  
 25 propagante ao longo fibra multimodo (4), cujo diâmetro é superior ao diâmetro do núcleo (10) da fibra monomodo (2), sendo portanto menor, ou no máximo igual, ao diâmetro do núcleo (13) da fibra multimodo (4). O feixe luminoso (15') que é o próprio campo luminoso propagante ao longo da fibra  
 30 multimodo (4), consiste no domínio espacial em centenas, milhares ou milhões de raios (ou modos) designados individualmente por i, cada qual divergindo de (12) e se propagando com um ângulo diferente  $\theta_i$  de tal forma que  $\theta_i \leq$

$\theta_{\text{máx}}$ . O feixe luminoso (15') consiste então de raios propagantes que formam ramos de parábolas crescentes e decrescentes que compõem um padrão cíclico com um período espacial  $P$  bem determinado que é denominado de *pitch*, que  
 5 depende de fatores geométricos e materiais da fibra multimodo (4), cujo valor pode ser calculado pela equação [3] descrita por,

$$P = \sqrt{\frac{2}{\Delta}} \pi a$$

[3]

10 onde em [3], o fator  $\Delta$  é a diferença relativa entre o índice de refração  $n_0$  no centro do núcleo e o índice de refração na casca  $n_c$  dada aproximadamente pela equação [4]:

$$\Delta = \frac{n_0 - n_c}{n_0} \quad [4].$$

Fibras multimodo de índice gradual no padrão de  
 15 Telecomunicações, disponíveis comercialmente, apresentam tipicamente, mas não exclusivamente um *pitch* em torno de 1 mm. Na FIGURA 3, está demarcado o comprimento de um "meio-*pitch*" ou  $P/2$  da trajetória do feixe de raios (15'). Este padrão de trajetórias consiste em um efeito físico-geométrico onde a luz (1) se propaga no domínio espacial divergindo de (12) e cada raio  $i$  se propaga com um ângulo  $\theta_i$  diferente. Desta forma, todos estes raios componentes do feixe (15') após percorrerem um certo comprimento de fibra multimodo de índice gradual como a (4), chegarão com atraso  
 20 temporal relativo minimizado com relação a uma fibra multimodo de índice degrau semelhante. Este mecanismo é usado para minimizar o efeito da dispersão modal em Telecomunicações onde se utiliza fibras ópticas multimodo. O feixe luminoso (15') é então uma ilustração do padrão de  
 25 trajetórias parabólicas cíclicas dos raios (modos) propagantes, com relação à coordenada radial da fibra

multimodo (4) e na sua posição esticada (7), onde as setas em alguns raios representados esquematicamente indicam que o feixe incide a partir da interface (12), passa através do segmento esticado e imobilizado de fibra multimodo gradual

5 (7) que sofre uma variação de comprimento  $|\Delta L_0|$ , prossegue se propagando pela fibra multimodo (4) e retorna por reflexão (1') na extremidade clivada (8) por esta mesma fibra multimodo (4). Quando uma variação de comprimento  $|\Delta L_0|$  é imposta à fibra multimodo (7), surge um efeito de

10 lente do tipo GRIN (*Graded-Index*) ou índice de refração gradual, onde periodicamente, com período  $P$  (*pitch*), a luz (1) é alternadamente focalizada e desfocalizada na extremidade refletora (8). A luz (1) é então parcialmente refletida a partir da extremidade clivada (8) sob a forma

15 da fração de potência óptica (1'), e passa a se propagar no sentido inverso pela mesma fibra multimodo (4), com o mesmo padrão de trajetórias parabólicas periódicas (cíclicas) com um *pitch*  $P$ . A luz (1) e sua fração (1') percorre então no total, duas vezes a fibra multimodo (7), e esta fração

20 refletida da luz (1') também será de forma análoga, alternadamente focalizada e desfocalizada na interface (12). Deve-se observar, que se a extremidade clivada (8) for realizada num plano perpendicular ao eixo da fibra multimodo (4), todos os raios componentes do feixe (15')

25 serão refletidos por esta extremidade clivada (8) e ainda se propagará de forma que seus raios continuem formando ângulos  $\theta_i$  com relação ao eixo axial da fibra multimodo (4) dentro do cone de injeção luminosa compatível com a abertura numérica da fibra monomodo injetora (2). Quando a

30 frente luminosa refletida do feixe (15') finalmente chega a posição onde está localizada a interface (12), ocorrerá neste ponto uma filtragem espacial de uma parte dos raios componentes do feixe (15'). Deve-se observar que a

magnitude da referida filtragem espacial está diretamente relacionada com a área de secção reta instantânea da frente luminosa refletida do feixe (15') no momento em que incide na interface de conexão (3) em comparação com a área de
 5 secção reta do núcleo (10) da fibra monomodo (2). Como o número total de raios do feixe luminoso (15') é uma constante, conclui-se que o seu número por unidade de área de secção reta (densidade) varia ao incidir na interface de
 conexão (3) como função da variação de comprimento  $|\Delta L_0|$ 
 10 sofrida pela fibra multimodo (7), ou seja, do defasamento imposto pelo strain. Os raios do feixe (15') que incidem na interface de conexão (3), porém fora da área de secção reta da interface (12), sendo a mesma que do núcleo (10) da fibra monomodo (2), embora estejam dentro de ângulos
 15 permitidos para a reinjeção óptica, não serão reacoplados no núcleo (10) da fibra monomodo (2), pois a incidência óptica se dará através da casca (11) desta mesma fibra monomodo (2). Portanto a luz reinjetada (9) na fibra monomodo (2) através da interface/filtro espacial (12)
 20 passará a ser, por conseguinte, modulada na intensidade óptica com relação à fração luminosa (1') como função da variação de comprimento  $|\Delta L_0|$  sofrida pela fibra multimodo (7). Se a extremidade clivada (8) for realizada em um ângulo diferente de  $90^\circ$  com relação ao eixo axial da fibra
 25 multimodo (4), o mecanismo anteriormente descrito continua válido, porém surge um outro mecanismo atuando em superposição com o primeiro. Este segundo mecanismo surge, pois uma parte dos raios do feixe (15') depois de serem refletidos pela extremidade clivada (8), agora inclinada,
 30 passam a se retropropagarem em ângulos  $\theta_i'$  com relação ao eixo axial da fibra multimodo (4) não compatíveis com a abertura numérica NA da fibra monomodo injetora (2). Uma parte destes raios retropropagantes em ângulos  $\theta_i'$  poderá



incidir diretamente sobre a interface (12), porém não serão reacoplados no núcleo (10) da fibra monomodo (12) pois estarão fora de seu cone (15) de aceitação luminosa.

Para detalhar o funcionamento da invenção em modo  
5 reflexivo e/ou transmissivo, serão utilizadas as FIGURAS 4,  
5 e 6, análogas respectivamente as FIGURAS 1, 2 e 3. O  
mecanismo de funcionamento é exatamente o mesmo e toda a  
explicação feita anteriormente continua aqui válida. As  
FIGURAS 4 e 5 referem-se ao diagrama da arquitetura  
10 preferencial da presente invenção de forma que a FIGURA 4 é  
uma vista em perspectiva lateral e a FIGURA 5 em  
perspectiva superior. A FIGURA 6 mostra um diagrama em  
forma ampliada da região cercada por um traçado pontilhado  
nas FIGURAS 4 e 5 compreendendo a fibra óptica monomodo  
15 (2), a interface de conexão (3) e a fibra óptica multimodo  
de índice gradual (4) e seu segmento esticado e imobilizado  
(7), e a extremidade clivada (8), com o intuito de auxiliar  
na explicação mais detalhada do mecanismo fundamental de  
funcionamento do invento. As FIGURAS 4 e 5 mostram o  
20 diagrama da arquitetura preferencial da presente invenção  
onde (1) é a luz de interrogação injetada no dispositivo  
através de uma fibra óptica monomodo (2). A emenda ou  
conexão (3) consiste na continuidade que pode ser obtida  
através da emenda por fusão ou conexão mecânica entre a  
25 fibra óptica monomodo (2) e uma fibra multimodo de índice  
gradual (4) que se segue, gerando então uma interface  
óptica (3). A fibra multimodo (4) conectada a monomodo (2)  
é a do tipo de perfil radial de índice de refração gradual  
parabólico e as setas nas FIGURAS 4 e 5 apontam para as  
30 regiões onde a fibra multimodo (4) não está esticada. A  
fibra multimodo (4) pode ser uma fibra padrão de 50/125 ou  
62,5/125  $\mu\text{m}$  de Telecomunicações, embora a invenção não se  
limite a esta. A fibra multimodo (4) deve então ser  
adequadamente esticada e imobilizada em um comprimento

arbitrário  $L_0$  ao longo de um substrato sólido de superfície plana (5) de natureza material qualquer, do qual se deseja medir variações de comprimento  $|\Delta L_0|$ . Esta imobilização é feita em dois pontos (6), desta forma produzindo um

5 segmento esticado de fibra multimodo (7) com comprimento  $L_0$  antes de sofrer qualquer variação de comprimento imposta pelo substrato plano (5). Deve-se observar que o segmento de fibra multimodo esticada (7) consiste na mesma fibra óptica multimodo não-esticada (4). O segmento de fibra

10 multimodo (7) deve ser mantido esticado qualquer que seja a temperatura em que o invento esteja operando. Nestas condições, a luz (1) após se propagar ao longo da fibra monomodo (2), será injetada na conexão (3) na fibra multimodo de índice gradual (4) não-esticada e desta forma

15 irá se propagar através da porção esticada (7) da fibra multimodo que se encontra imobilizada em um comprimento  $L_0$  ao longo do substrato plano (5) quando este último não sofreu ainda qualquer variação de comprimento  $|\Delta L_0|$ . Devido a uma causa física qualquer (efeito mecânico, térmico ou

20 ação de campos eletromagnéticos), o substrato plano (5) poderá sofrer variações de comprimento que serão totalmente transmitidos ao longo da fibra multimodo (7). Desta forma, a luz (1) sofrerá um defasamento (modulação) no padrão espacial de guiamento óptico ao se propagar através da

25 fibra multimodo (7) caso a mesma tenha sofrido alguma variação de comprimento  $|\Delta L_0|$ . A luz (1) continua a se propagar através do segmento (4) de fibra multimodo não-esticada até atingir uma segunda interface de conexão óptica (16) inteiramente similar a (3). A luz (1) sofre

30 então uma filtragem espacial de modos e é injetada em um segmento de fibra monomodo (17), tipicamente, mas não exclusivamente sendo de Telecomunicações com  $9/125 \mu\text{m}$ . Parte da luz (1) é parcialmente refletida pela extremidade

clivada (18) como sendo a parcela (19') e a fração restante emerge do dispositivo como a luz de saída (19) quando o mesmo opera em regime transmissivo. A luz (19) deve ser subsequentemente detectada e adequadamente processada. A

5 fração refletida da luz (19'), retorna se propagando pela fibra monomodo (17) e é reinjetada na fibra multimodo (4) através da interface de conexão (16). Portanto a luz (1) propaga-se novamente através da fibra multimodo (4) e passa novamente pelo segmento esticado de fibra multimodo (7) que

10 sofreu variação de comprimento  $|\Delta L_0|$ , portanto sofrendo uma modulação adicional em sua fase espacial de guiamento. A luz (19') propaga-se, por conseguinte, pelo segmento não-esticado da fibra multimodo (4) e é reinjetada na fibra monomodo (2) após atravessar a emenda (3). Nesta etapa,

15 ocorre novamente uma filtragem espacial de modos e a luz (19') sofre uma modulação adicional em sua intensidade como função da variação de comprimento  $|\Delta L_0|$  da fibra multimodo (7) resultando na luz (9). A luz (9) então modulada na intensidade com relação à luz injetada (1), emerge do

20 dispositivo e segue para detecção e processamentos subsequentes caso o dispositivo opere em regime reflexivo. Alternativamente, pode-se detectar e processar simultaneamente os sinais ópticos (9) e (19) modulados na intensidade com relação ao (1).

25 A FIGURA 6 mostra um diagrama em forma ampliada da região cercada por um traçado pontilhado nas FIGURAS 4 e 5, compreendendo a fibra óptica monomodo (2), a interface de conexão (3), a fibra óptica multimodo de índice gradual (4) e o seu segmento esticado e imobilizado (7), a interface de

30 conexão (16) e a fibra óptica monomodo (17). Desta forma, a luz de interrogação (1) é injetada no núcleo (10) da fibra óptica monomodo (2) que é também composta pela casca (11). A luz (1) após propagar-se pela fibra monomodo (2), incide na interface de conexão (3) a partir de onde é injetada na

fibra multimodo de índice gradual (4). A referida injeção da luz (1) é realizada mais especificamente na interface (12) entre o núcleo (10) da fibra monomodo (2) e o núcleo (13) fibra multimodo de índice gradual (4). A luz (1) é
 5 então injetada de forma estável a partir da interface (12) no núcleo (13) da fibra multimodo (4), também composta da casca (14) formando um cone luminoso (15). O cone luminoso (15) injetado a partir de (12) propaga-se ao longo do núcleo (13) da fibra multimodo (4), ao mesmo tempo que
 10 diverge do referido do ponto de injeção (12). A fibra óptica multimodo (4) é a com perfil gradual aproximadamente do tipo parabólico quanto à distribuição radial do seu índice de refração. O feixe luminoso (15') consiste então de centenas, milhares ou milhões de raios propagantes que
 15 formam ramos de parábolas crescentes e decrescentes que compõem um padrão cíclico com um período espacial  $P$  bem determinado (*pitch*). Na FIGURA 6, está demarcado um "meio-*pitch*" ou  $P/2$  da trajetória do feixe luminoso (15'). O feixe luminoso (15') é então uma ilustração do padrão de
 20 trajetórias parabólicas cíclicas dos raios (modos) propagantes com relação à coordenada radial da fibra multimodo (4), onde as setas em alguns raios representados esquematicamente indicam que o feixe incide a partir da interface (12), passa através do segmento esticado e
 25 imobilizado de fibra multimodo gradual (7) que sofre uma variação de comprimento  $|\Delta L_0|$ , prossegue se propagando pela fibra multimodo (4) e é injetado a partir da interface de conexão óptica (16) na interface (20) no núcleo (21) de uma fibra monomodo (17) dotada de uma casca (22). Esta injeção
 30 óptica, realizada através da interface (20), realiza uma primeira filtragem espacial de modos. Quando uma variação de comprimento  $|\Delta L_0|$  é imposta a fibra multimodo (7), surge um efeito de lente do tipo GRIN (*Graded-Index*) ou índice de

refração gradual, onde periodicamente, com período  $P$  (*pitch*), a luz (1) é alternadamente focalizada e desfocalizada na interface (20), ocorrendo aí, portanto uma primeira conversão para modulação na intensidade. A luz

5 (1), agora modulada na intensidade, propaga-se pela fibra monomodo (17) até atingir a sua extremidade clivada (18). Uma fração de potência óptica (19) da luz (1) é transmitida pelo dispositivo e o restante (19') retorna por reflexão e passa a se propagar no sentido inverso. A luz refletida

10 (19') é reinjetada na fibra multimodo (4) através da interface (20). A luz (19') passa então a se propagar no sentido inverso pela mesma fibra multimodo (4), com o mesmo padrão de trajetórias parabólicas periódicas com um *pitch*  $P$ . A fração de luz (19') percorre então no total, duas

15 vezes a fibra multimodo (7) e esta também será de forma análoga, alternadamente focalizada e desfocalizada na interface (12). Quando a frente luminosa refletida do feixe (15') chega a posição onde está localizada a interface (12), ocorrerá neste ponto uma nova filtragem espacial de

20 uma parte dos raios componentes do feixe (15'). Nesta etapa, ocorre novamente uma filtragem espacial de modos e a luz (19') sofre uma modulação adicional em sua intensidade óptica como função da variação de comprimento  $|\Delta L_0|$  da fibra multimodo (7) resultando na luz (9). A luz (9) então

25 modulada na intensidade com relação à luz injetada (1), emerge do dispositivo e segue para detecção e processamento subsequente caso o dispositivo opere em regime reflexivo. Alternativamente, pode-se detectar e processar simultaneamente os sinais ópticos (9) e (19) modulados na

30 intensidade com relação ao (1).

A FIGURA 7 mostra o diagrama da arquitetura preferencial da presente invenção que é inteiramente análogo ao mostrado na FIGURA 2. A FIGURA 7 mostra uma implementação do invento operando em regime reflexivo onde a fibra multimodo (4)

possui um segmento esticado e imobilizado (23) de comprimento não-perturbado  $L_0$ . Neste caso, a imobilização da fibra multimodo (23) é realizada ao longo de todo o seu comprimento  $L_0$ . Este comprimento  $L_0$  pode ser imobilizado  
5 sobre o substrato (5) com o uso de adesivos adequados. Alternativamente a fibra multimodo (23) poderá ser do tipo metalizada em torno de sua superfície externa, e então poderá ser imobilizada com o uso de um adesivo óptico ou ser diretamente soldada no substrato (5) caso este seja de  
10 natureza metálica. De resto, o dispositivo mostrado em diagrama na FIGURA 7, opera de forma idêntica ao mostrado na FIGURA 2 e mais detalhadamente pela FIGURA 3.

A FIGURA 8 mostra o diagrama da arquitetura preferencial da presente invenção que é inteiramente análogo ao mostrado na  
15 FIGURA 5. A FIGURA 8 mostra uma implementação do invento operando em regime reflexivo e/ou transmissivo onde a fibra multimodo (4) possui um segmento esticado e imobilizado (23) de comprimento não-perturbado  $L_0$ . Neste caso, a imobilização da fibra multimodo (23) é realizada ao longo  
20 de todo o seu comprimento  $L_0$ . Este comprimento  $L_0$  pode ser imobilizado sobre o substrato (5) com o uso de adesivos adequados. Alternativamente a fibra multimodo (23) poderá ser do tipo metalizada em torno de sua superfície externa, e então poderá ser imobilizada com o uso de um adesivo  
25 óptico ou ser diretamente soldada no substrato (5) caso este seja de natureza metálica. De resto, o dispositivo mostrado em diagrama na FIGURA 8, opera de forma idêntica ao mostrado na FIGURA 5 e mais detalhadamente pela FIGURA 6.

30 A FIGURA 9 mostra o diagrama da arquitetura preferencial da presente invenção que é inteiramente análogo ao mostrado na FIGURA 2. A FIGURA 9 mostra uma implementação do invento operando em regime reflexivo onde a fibra multimodo (4) possui três segmentos esticados e imobilizados (7) de

comprimentos não-perturbados  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$  não necessariamente iguais. A finalidade desta implementação, é a de possibilitar um aumento da sensibilidade e/ou faixa dinâmica de operação do invento quando comparado ao mesmo quando implementado conforme o diagrama mostrado na FIGURA 2. Deve-se aqui enfatizar, que a FIGURA 9 mostra três segmentos imobilizados (7) apenas a título ilustrativo, ou seja, o invento não se limita a apenas estes três segmentos. Estes comprimentos  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$  podem ser imobilizados sobre o substrato (5) nos pontos (6) com o uso de adesivos adequados. Alternativamente a fibra multimodo (23) poderá ser do tipo metalizada em torno de sua superfície externa, e então poderá ser imobilizada com o uso de um adesivo óptico ou ser diretamente soldada no substrato (5) caso este seja de natureza metálica. De resto, o dispositivo mostrado em diagrama na FIGURA 9, opera de forma idêntica ao mostrado na FIGURA 2 e mais detalhadamente pela FIGURA 3.

A FIGURA 10 mostra o diagrama da arquitetura preferencial da presente invenção que é inteiramente análogo ao mostrado na FIGURA 5. A FIGURA 10 mostra uma implementação do invento operando em regime reflexivo e/ou transmissivo onde a fibra multimodo (4) possui três segmentos esticados e imobilizados (7) de comprimentos não-perturbados  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$  não necessariamente iguais. A finalidade desta implementação é a de possibilitar um aumento da sensibilidade e/ou faixa dinâmica de operação do invento quanto comparado ao mesmo quando implementado conforme o diagrama mostrado na FIGURA 5. Deve-se aqui enfatizar que a FIGURA 10 mostra três segmentos imobilizados (7) apenas a título ilustrativo, ou seja, o invento não se limita a apenas estes três segmentos. Estes comprimentos  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$  podem ser imobilizados sobre o substrato (5) nos pontos (6) com o uso de adesivos adequados. Alternativamente a fibra

multimodo (23) poderá ser do tipo metalizada em torno de sua superfície externa, e então poderá ser imobilizada com o uso de um adesivo óptico ou ser diretamente soldada no substrato (5) caso este seja de natureza metálica. De  
5 resto, o dispositivo mostrado em diagrama na FIGURA 10, opera de forma idêntica ao mostrado na FIGURA 5 e mais detalhadamente pela FIGURA 6.

A FIGURA 11 mostra o diagrama da arquitetura preferencial da presente invenção que é inteiramente análogo ao mostrado  
10 na FIGURA 7. A FIGURA 11 mostra uma implementação do invento operando em regime reflexivo onde a fibra multimodo (4) possui três segmentos esticados e imobilizados (23) de comprimentos não-perturbados  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$  não necessariamente iguais. Neste caso, a imobilização da fibra multimodo (23)  
15 é realizada ao longo de todo os seus comprimentos  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$ . Deve-se aqui enfatizar que a FIGURA 11 mostra três segmentos imobilizados (23) apenas a título ilustrativo, ou seja, o invento não se limita a apenas estes três segmentos. A finalidade desta implementação é a de  
20 possibilitar um aumento da sensibilidade e/ou faixa dinâmica de operação do invento quanto comparado ao mesmo quando implementado conforme o diagrama mostrado na FIGURA 7. Estes comprimentos  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$  podem ser imobilizados sobre o substrato (5) com o uso de adesivos adequados.  
25 Alternativamente a fibra multimodo (23) poderá ser do tipo metalizada em torno de sua superfície externa, e então poderá ser imobilizada com o uso de um adesivo óptico ou ser diretamente soldada no substrato (5) caso este seja de natureza metálica. De resto, o dispositivo mostrado em  
30 diagrama na FIGURA 11 opera de forma idêntica ao mostrado na FIGURA 7 e mais detalhadamente pela FIGURA 3.

A FIGURA 12 mostra o diagrama da arquitetura preferencial da presente invenção que é inteiramente análogo ao  
mostrado na FIGURA 8. A FIGURA 12 mostra uma implementação



do invento operando em regime reflexivo e/ou transmissivo onde a fibra multimodo (4) possui três segmentos esticados e imobilizados (23) de comprimentos não-perturbados  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$  não necessariamente iguais. Neste caso, a

5 imobilização da fibra multimodo (23) é realizada ao longo de todo os seus comprimentos  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$ . Deve-se aqui enfatizar que a FIGURA 12 mostra três segmentos imobilizados (23) apenas a título ilustrativo, ou seja, o invento não se limita a apenas estes três segmentos. A

10 finalidade desta implementação é a de possibilitar um aumento da sensibilidade e/ou faixa dinâmica de operação do invento quanto comparado ao mesmo quando implementado conforme o diagrama mostrado na FIGURA 8. Estes comprimentos  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$  podem ser imobilizados sobre o

15 substrato (5) com o uso de adesivos adequados. Alternativamente a fibra multimodo (23) poderá ser do tipo metalizada em torno de sua superfície externa, e então poderá ser imobilizada com o uso de um adesivo óptico ou ser diretamente soldada no substrato (5) caso este seja de

20 natureza metálica. De resto, o dispositivo mostrado em diagrama na FIGURA 12, opera de forma idêntica ao mostrado na FIGURA 8 e mais detalhadamente pela FIGURA 6.

A FIGURA 13 mostra o diagrama da arquitetura preferencial da presente invenção que é inteiramente análogo ao mostrado

25 na FIGURA 2. A FIGURA 13 mostra uma implementação do invento operando em regime reflexivo onde a fibra multimodo (4) possui um segmento (24) de comprimento não-perturbado  $L_0$  coberto em sua superfície externa por uma ou mais camadas de um material no estado sólido de natureza

30 arbitrária. Estas camadas devem preferencialmente, mas não exclusivamente, serem concêntricas com relação ao núcleo (13) e casca (14) da fibra multimodo (4). Este material que reveste externamente o segmento (24) de fibra multimodo deve ser conveniente para a aplicação específica a que o

invento se destina. A cobertura da fibra multimodo (24) pode ser de uma ou mais camadas metálicas como o ouro, prata, níquel, cromo, alumínio ou cobre, embora a invenção não se limite a estes elementos. A espessura de uma camada metálica deve ser tipicamente, mas não exclusivamente, superior a 10  $\mu\text{m}$ . Desta forma, todo o conjunto de fibra metalizada (24) se dilata ou contrai de  $|\Delta L_0|$  conforme o aumento ou diminuição da temperatura respectivamente. O invento quando implementado desta forma, continua a ser um sensor de variação de comprimento  $|\Delta L_0|$  da fibra multimodo (24), no entanto esta variação agora se deve a uma outra causa externa, ou seja, a variação de temperatura. Portanto o invento quando implementado desta forma torna-se um sensor de temperatura. A cobertura da fibra multimodo (24) pode ser de uma ou mais camadas de material com propriedades piezoelétricas, ou seja, são materiais que se dilatam ou contraem na presença de campos elétricos aplicados. Como exemplos: Titanato de bário ( $\text{BaTiO}_3$ ), quartzo e certas cerâmicas. O invento quando implementado desta forma, continua a ser um sensor de variação de comprimento  $|\Delta L_0|$  da fibra multimodo (24), no entanto esta variação agora se deve a uma outra causa externa, ou seja, os campos elétricos. Portanto o invento quando implementado desta forma, torna-se um sensor de voltagem elétrica. A cobertura da fibra multimodo (24) pode ser de uma ou mais camadas de material com propriedades magnetostrictivas, ou seja, são materiais que se dilatam ou contraem na presença de campos magnéticos aplicados. Como exemplos: O níquel e certos vidros dopados com metais. O invento quando implementado desta forma, continua a ser um sensor de variação de comprimento  $|\Delta L_0|$  da fibra multimodo (24), no entanto esta variação agora se deve a uma outra causa externa, ou seja, os campos magnéticos. Portanto o invento

quando implementado desta forma torna-se um sensor de corrente elétrica. De resto, o dispositivo mostrado em diagrama na FIGURA 13, opera de forma idêntica ao mostrado na FIGURA 2 e mais detalhadamente pela FIGURA 3.

5 A FIGURA 14 mostra o diagrama da arquitetura preferencial da presente invenção que é inteiramente análogo à arquitetura mostrada na FIGURA 5. A FIGURA 14 mostra uma implementação do invento operando em regime reflexivo e/ou transmissivo onde a fibra multimodo (4) possui um segmento  
10 (24) de comprimento não-perturbado  $L_0$  coberto em sua superfície externa por uma ou mais camadas de um material no estado sólido de natureza arbitrária. A descrição que se segue é análoga à da FIGURA 13. De resto, o dispositivo mostrado em diagrama na FIGURA 14, opera de forma idêntica  
15 ao mostrado na FIGURA 5 e mais detalhadamente pela FIGURA 6.

A FIGURA 15 mostra o diagrama em secção reta da fibra óptica multimodo (24) com cobertura superficial (25) de um filme fino ou espesso de um material sólido de natureza  
20 arbitrária, fazendo parte dos diagramas mostrados nas FIGURAS 13 e 14 onde (13) é o núcleo e (14) a casca desta mesma fibra óptica multimodo (24). A técnica a ser utilizada para realizar o recobrimento da fibra multimodo (24) pode ser por evaporação térmica, *sputtering*, *glow-*  
25 *discharge* ou metalização em banho de solução, embora a invenção não esteja limitada a estas. Embora só esteja representada uma camada, é a título ilustrativo e pode-se ter duas ou mais camadas de materiais iguais ou diferentes. A presente invenção é descrita ilustrativamente através dos  
30 exemplos práticos e testados apresentados abaixo. É necessário enfatizar que a invenção não está limitada a estes exemplos e que também inclui variações e modificações dentro dos limites nos quais ela funciona.

Exemplo 1: Sensor de variação de comprimento (arranjo

preferencial)

Para implementar a invenção diretamente como um sensor de variação de comprimento (*strain-gage*) é recomendável, porém não obrigatório, que o substrato (5) onde a medição seja feita, possua coeficiente de dilatação térmica aproximadamente igual ao da sílica fundida, que seja usado em ambientes com temperatura controlada ou que esta naturalmente não varie apreciavelmente, que se faça algum tipo de compensação térmica ou que um sensor de temperatura isolado da variação de comprimento (*strain*) seja posicionado no mesmo ponto. A fibra multimodo de índice gradual (4) poderá ser diretamente imobilizada sob a forma de um segmento (7) na superfície a ser sensoriada, ou indiretamente, ou seja, imobilizada sobre um substrato plano (5) ou ao longo de um capilar, que por sua vez podem ser imobilizados sobre a superfície (5) a ser sensoriada. A invenção não se limita as técnicas de imobilização anteriormente mencionadas. A razão disto é para que não haja uma mistura de efeitos caso a temperatura do substrato (5) varie enquanto a variação de comprimento estiver sendo sensoriada. Isto significa que a variação de comprimento  $|\Delta L_0|$  sofrida pelo substrato (5) e transmitida à fibra multimodo (7) é originado por mecanismos não necessariamente térmicos. Em qualquer dos casos, na referida região sensível não devem existir problemas significativos de gradiente de temperatura, o que implicaria em erros de medida. Esta relativa insensibilidade térmica é não só garantida pelo mecanismo básico de funcionamento do sensor, como também pode ser pelo comprimento físico arbitrário  $L_0$  da fibra multimodo esticada e imobilizada (7).

A FIGURA 16 mostra graficamente um resultado de medida da variação de comprimento de uma fibra multimodo de índice gradual (7), conforme os diagramas mostrados nas

FIGURAS 1 ou 2 utilizando comprimento de onda de  
interrogação óptica em 1310 nm. Pode ser observado um  
comportamento com resposta linear entre 0 e ~ 4.500  $\mu\text{e}$  de  
alongamento da fibra multimodo (7) e sensibilidade de -  
5 0,0005 dB/ $\mu\text{e}$ . O gráfico mostrado na FIGURA 17 foi obtida  
nas mesmas condições da FIGURA 16, apenas foi realizada uma  
nova clivagem na extremidade (8) da fibra multimodo (4).  
Pode-se observar um comportamento tendenciosamente cíclico  
da resposta óptica do dispositivo aqui objeto de invenção,  
10 fato este que está em conformidade com o seu mecanismo  
básico de funcionamento. O sinal exibe uma inversão de  
comportamento em ~ 3.100  $\mu\text{e}$ . A FIGURA 17a mostra um  
gráfico que na realidade é um segmento do mostrado na  
FIGURA 17, ou seja, mostra apenas que entre 0 e 2.700  $\mu\text{e}$  há  
15 um comportamento de resposta linear com sensibilidade de -  
0,0016 dB/ $\mu\text{e}$ . O gráfico ilustrado na FIGURA 18 mostra  
comparativamente a resposta óptica do dispositivo quando  
interrogado opticamente por dois comprimentos de onda  
diferentes, ou seja, 1310 e 1550 nm. Observa-se que ambos  
20 os gráficos são tendenciosamente cíclicos e defasados entre  
si. Ambos também apresentam regiões de resposta óptica  
razoavelmente linear. Este defasamento, assim como a  
diferença entre seus períodos de ciclo, se deve a  
otimização na fabricação da fibra multimodo de índice  
25 gradual (4) de forma que a sua dispersão de perfil seja  
minimizada em 1310 nm. A FIGURA 19 mostra a resposta linear  
do dispositivo num intervalo de  $\Delta L_0/L_0 = 3.600 \mu\text{e}$  e  
sensibilidade de - 0,0011 dB/ $\mu\text{e}$  quando interrogado  
opticamente com comprimento de onda em 1550 nm. Esta  
30 sensibilidade, demonstra que o invento é capaz de resolver  
variações de comprimento (*micro-strain*) da ordem de 10  $\mu\text{e}$ ,  
valor este que é em princípio limitado apenas pelo  
equipamento utilizado para a interrogação/demodulação que

foi um OTDR comercial utilizado normalmente em Telecomunicações. A FIGURA 20 mostra a resposta óptica correspondente a implementação do invento conforme o diagrama mostrado na FIGURA 9, onde foram imobilizados dois  
 5 segmentos de fibra multimodo (7) e a interrogação óptica foi feita com comprimento de onda em 1310 nm. Pode-se mais uma vez observar um comportamento tendenciosamente cíclico, onde a região com  $\Delta L_0/L_0 \sim 1.800 \mu\text{e}$  de faixa e exibindo comportamento linear é mostrado na FIGURA 20a com  
 10 sensibilidade de  $- 0,00035 \text{ dB}/\mu\text{e}$ . A FIGURA 21 mostra graficamente a resposta óptica do mesmo dispositivo mostrado na FIGURA 9 após uma nova clivagem da extremidade (8). Observa-se um comportamento bastante linear em uma região com  $\Delta L_0/L_0 \sim 1.500 \mu\text{e}$  de faixa com uma sensibilidade  
 15 de  $- 0,003 \text{ dB}/\mu\text{e}$  quando interrogado opticamente com 1310 nm. Este resultado mostra o potencial do invento para medir variações de comprimento com resolução de  $\sim 3 \mu\text{e}$  ainda utilizando o mesmo OTDR comercial anteriormente mencionado. A FIGURA 22 mostra um resultado semelhante ao anterior  
 20 considerando que o dispositivo foi agora interrogado opticamente no comprimento de onda em 1550 nm. Observa-se uma região bastante linear com  $\Delta L_0/L_0 \sim 1.200 \mu\text{e}$  de faixa e sensibilidade de  $+ 0,0003 \text{ dB}/\mu\text{e}$ .

#### Exemplo 2: Sensor de temperatura

25 Para implementar a invenção como um sensor de temperatura, é recomendável, porém não obrigatório, o uso de substratos (5) metálicos. De forma mais geral, torna-se necessário o uso de substratos com coeficiente de expansão linear superior ao da sílica fundida ( $5,2 \times 10^{-7} \text{ } ^{-1}\text{C}^{\circ}$ ) que é  
 30 a matéria-prima de fabricação das fibras ópticas convencionais de sílica. As fibras ópticas poliméricas, não são em geral recomendadas para este tipo de aplicação devido ao fato de que em geral não podem resistir

temperaturas próximas de 100 °C. Pode-se utilizar substratos (5) com coeficiente de expansão térmica linear superior ao da sílica fundida, que podem ser fabricados a partir de diversos metais e ligas como: Alumínio, cobre, bronze, aço etc, embora a invenção não se limite a estes materiais. Adicionalmente, a cobertura superficial de filme fino ou espesso (25) conforme mostrado nas FIGURAS 13, 14 e 15, também deverá consistir dos materiais mencionados anteriormente, porém o filme (25) poderá ser composto de duas ou mais camadas de materiais diferentes. A razão deste procedimento poderá ser o de melhorar a aderência do filme (25) sobre a superfície da fibra óptica multimodo (7). A medida que a temperatura varia, o substrato (5) varia de comprimento  $|\Delta L_0|$  e por conseguinte a fibra óptica multimodo de índice gradual (7) é forçada a acompanhar esta variação de comprimento, pois está esticada em um ou mais segmentos (7) sobre o referido substrato (5). No caso das fibras ópticas multimodo de índice gradual com cobertura de filme (24), forma-se uma estrutura composta da fibra óptica e uma ou mais camadas concêntricas (25) de materiais com coeficiente de expansão térmica linear superior ao da sílica. Esta estrutura, onde a camada depositada geralmente possui no mínimo 10  $\mu\text{m}$  de espessura, terá um coeficiente de expansão térmica linear de valor intermediário à sílica e ao material metálico utilizado como cobertura. O substrato (5) ou a fibra metalizada (24) deverão ser postos em contato físico direto com o ponto onde se deseje medir ou monitorar a temperatura, região esta que deverá possuir um bom contato térmico para que problemas de gradiente de temperatura não provoquem erros de medida.

A FIGURA 23 mostra graficamente um resultado de medida da temperatura relativo a implementação do invento conforme esquematizado na FIGURA 5 operando em modo reflexivo. Para isto, o substrato (5) consistiu de um bloco

de alumínio com superfície plana sobre o qual cerca de  $L_0 = 8$  cm de fibra óptica multimodo de índice gradual (7) padrão de Telecomunicações foi utilizada. Esta fibra possui um núcleo com diâmetro de  $62,5 \mu\text{m}$  e abertura numérica de 0,28.

5 As fibras monomodo (2) e (17) foram também as utilizadas em Telecomunicações com padrão de  $9/125 \mu\text{m}$ . A FIGURA 23 mostra um comportamento bastante linear (correlação de  $\sim 0,995$ ) para uma medida realizada entre  $29$  e  $58^\circ\text{C}$  utilizando a luz de um laser no comprimento de onda em  $1310$

10 nm como interrogação óptica. A sensibilidade obtida foi de  $-0,153 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ , o que mostra o potencial do invento para medir temperaturas com resolução melhor que  $0,1^\circ\text{C}$ , considerando ainda a utilização do mesmo OTDR comercial como equipamento de interrogação demodulação. Naturalmente

15 que a presente invenção não está limitada aos arranjos particulares descritos anteriormente, porém estende-se a quaisquer variantes dentro do espírito da invenção. Isto significa que as discussões anteriores são apenas exemplares, para propósitos de explicação e não de

20 limitação.



REIVINDICAÇÕES

1 - "Sensor de Variação de Comprimento (strain-gage) Baseado em Fibras Ópticas Multimodo de Perfil de Índice de Refração Gradual", que consiste de um dispositivo sensor a  
5 fibra óptica de pequenas variações de comprimento relativo tipicamente, mas não exclusivamente, entre 0 e 5.000  $\mu$ e de um substrato, causadas por quaisquer fatores externos como alongamento mecânico (strain), contração mecânica (stress), vibrações, pressão hidrostática ou axial, variação de  
10 temperatura, incidência de campos elétricos e/ou magnéticos, baseado no defasamento na direção axial da trajetória dos raios (modos) luminosos que se propagam com período bem determinado (pitch) através de um segmento de fibra óptica multimodo de perfil de índice de refração  
15 gradual parabólico convenientemente esticada e imobilizada sobre este substrato, quando é feito variar de  $|\Delta L_0|$  o seu comprimento inicial  $L_0$ , caracterizado por etapas de :  
(a) injetar e fazer propagar um sinal óptico de interrogação em comprimentos de onda, tipicamente, mas não  
20 exclusivamente, situados dentro da faixa 0,4 - 1,7  $\mu$ m com uma certa potência  $P_0$  através de uma fibra óptica monomodo (2) de pequena abertura numérica, tipicamente, mas não exclusivamente, igual ou menor que 0,10, de forma que a luz propagante fique confinada em um núcleo de pequeno  
25 diâmetro, tipicamente, mas não exclusivamente, de 9  $\mu$ m ou menor; (b) emendar uma extremidade clivada da fibra óptica monomodo (2) descrita em (a) em uma extremidade também clivada de um segmento de fibra óptica multimodo (7) de perfil de índice de refração gradual parabólico, de forma  
30 que o eixo axial de uma das fibras (2) e (4) seja coincidente (concêntrico) com o da outra fibra óptica, de forma que a sua abertura numérica seja maior que o da fibra

monomodo (2), que possua valores típicos, mas não exclusivos, situados dentro da faixa 0,25-0,30, que o seu diâmetro de núcleo seja maior que o da fibra óptica monomodo (2), com valores típicos, mas não exclusivos, de 50,0  $\mu\text{m}$ , 62,5  $\mu\text{m}$  ou 85,0  $\mu\text{m}$ ; (c) clivar a outra extremidade do segmento de fibra óptica multimodo (4) de perfil de índice de refração gradual parabólico de forma que a luz (1) injetada nesta pela fibra monomodo (2), possa retornar em parte por reflexão, onde uma fração desta última seja reinjetada na fibra óptica monomodo (2). (d) considerando uma certa temperatura ambiente inicial  $T_0$ , esticar uma fração de fragmento da fibra multimodo (4) de perfil de índice de refração gradual parabólico na superfície de um substrato plano (5) de um material qualquer, metálico, dielétrico, semiconductor, piezoelétrico, magnetostrictivo, dentre outros, e imobilizar esta fibra multimodo em dois pontos (6) distando de um comprimento  $L_0$  entre si, através, por exemplo, do uso de um adesivo adequado ou da realização de soldagem, caso a fibra multimodo tenha cobertura metálica (11) e o substrato (5) seja também de metal;

2 - Sensor, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por ser a extremidade clivada (8) da fibra óptica monomodo (2) emendada excentricamente com a extremidade clivada (8) da fibra óptica multimodo (4), de perfil de índice de refração gradual parabólico.

3 - Sensor, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por sua extremidade livre e clivada da fibra óptica multimodo (4), de perfil de índice de refração gradual parabólico ter a sua refletividade modificada, através do depósito ou integração de uma ou mais camadas de filmes

finos ou espessos de materiais dielétricos, semicondutores e/ou metálicos.

4 - Sensor, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por uma fração do segmento da fibra óptica multimodo (7),  
5 de perfil de índice de refração gradual parabólico seja por sua vez dividido em um número arbitrário de segmentos menores (7) com comprimentos  $L_1, L_2, \dots$ , e que cada um deles seja esticado e imobilizado sobre o substrato plano (5).

5 - Sensor, de acordo com a reivindicação 4, caracterizado  
10 por ser os segmentos da fibra óptica multimodo (7), de perfil de índice de refração gradual, de comprimentos  $L_1, L_2, \dots$ , esticados e imobilizados sobre o substrato plano (5), porém ao longo de todo o comprimento  $L_1, L_2, \dots$ .

6 - Sensor, de acordo com a reivindicação 5, caracterizado  
15 por um ou mais segmentos de fibra óptica multimodo (7), de perfil de índice de refração gradual parabólico, não estarem imobilizados sobre qualquer substrato plano (5), mas sim que possuam uma ou mais camadas de material metálico, piezoelétrico ou magnetoestritivo,  
20 suficientemente espessas, tipicamente, mas não exclusivamente, igual ou maior que 15  $\mu\text{m}$  de espessura, depositadas concentricamente ou não sobre a sua casca (11).

7 - Sensor, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado  
25 por se injetar luz (1) em uma fibra óptica multimodo (4) de perfil de índice de refração degrau, com diâmetro de núcleo menor (10) que o da fibra óptica multimodo (4) de perfil de índice de refração gradual parabólico, com a qual deve ser conectada.

8 - Sensor, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado  
30 por injetar luz (1) em uma fibra multimodo (4) de perfil de

índice de refração degrau, com abertura numérica menor que o da fibra óptica multimodo (4) de perfil de índice de refração gradual parabólico, com a qual deve ser conectada.

9 - Sensor, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado  
5 por inicialmente se injetar luz (1) em uma fibra multimodo (4) de perfil de índice de refração gradual qualquer, com diâmetro de núcleo (13) menor que o da fibra óptica multimodo (4) de perfil de índice de refração gradual parabólico, com a qual deve ser conectada.

10 10 - Sensor, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado  
por inicialmente se injetar luz (1) em uma fibra multimodo (4) de perfil de índice de refração gradual qualquer, com abertura numérica menor que o da fibra óptica multimodo (4) de perfil de índice de refração gradual parabólico, com a  
15 qual deve ser conectada.

11 - Sensor, de acordo com as reivindicações 1 e 3, caracterizado por ser feita a clivagem da extremidade (8) da fibra óptica multimodo (4) de perfil de índice de refração gradual parabólico, em um ângulo diferente de 90°  
20 com relação ao eixo axial da referida fibra.

12 - Sensor, de acordo com as reivindicações 1, 4 e 5, caracterizado por possuir a fibra multimodo (4) integrado ao substrato, perfil radial de índice de refração qualquer.

13 - Sensor, de acordo com a reivindicação 6, caracterizado  
25 por possuir a fibra multimodo (4) coberta com uma ou mais camadas finas ou espessas de um material qualquer, perfil radial de índice de refração qualquer.

14- Sensor, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado  
por estar a fibra multimodo (4) esticada e imobilizada em  
30 dois pontos (6) em um comprimento  $L_0$  sobre um substrato

plano (5) ou no interior de um tubo capilar qualquer, que por sua vez deve ser imobilizado sobre a superfície da qual se deseje realizar medições.

- 15    15 - Sensor, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por estar a fibra multimodo (4) esticada e imobilizada ao longo de um comprimento  $L_0$  sobre um substrato plano (5) ou no interior de um tubo capilar qualquer, que por sua vez deve ser imobilizado sobre a superfície da qual se deseje realizar medições.
- 10    16 - Sensor, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por estar a fibra multimodo (4) esticada e imobilizada em dois pontos (6), porém em dois ou mais segmentos de comprimentos arbitrários  $L_1, L_2, \dots$ , sobre um substrato plano (5) ou no interior de um tubos capilares quaisquer,
- 15    que por sua vez deve(m) ser imobilizado(s) sobre a superfície da qual se deseje realizar medições.
- 17 - Sensor, de acordo com a reivindicação 5, caracterizado por estar a fibra multimodo (4) esticada e imobilizada ao longo de dois ou mais segmentos de comprimentos arbitrários
- 20     $L_1, L_2, \dots$ , sobre um substrato plano (5) ou no interior de tubos capilares quaisquer, que por sua vez deve(m) ser imobilizado(s) sobre a superfície da qual se deseje realizar medições.
- 18 - Sensor de acordo com as reivindicações 1, 14 e 15,
- 25    caracterizado por estar o segmento de fibra multimodo (7) esticada e imobilizada dentro de um canal escavado no substrato de superfície plana (5).
- 19 - Sensor de acordo com as reivindicações 4, 5, 16 e 17, caracterizado por estarem os segmentos de fibra multimodo

(7) esticadas e imobilizadas dentro de canais escavados no substrato de superfície plana (5).

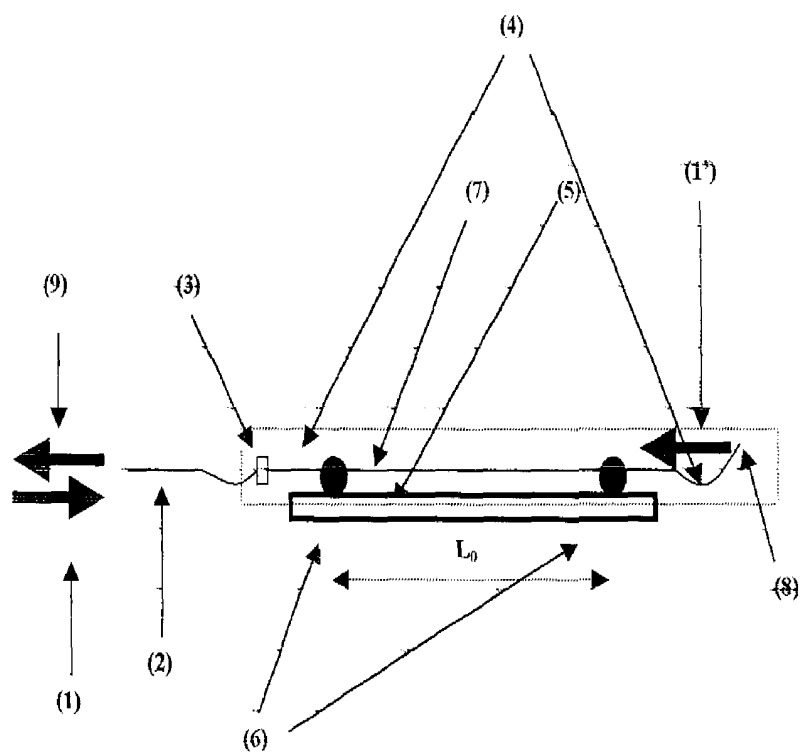
FIGURAS

FIGURA 1

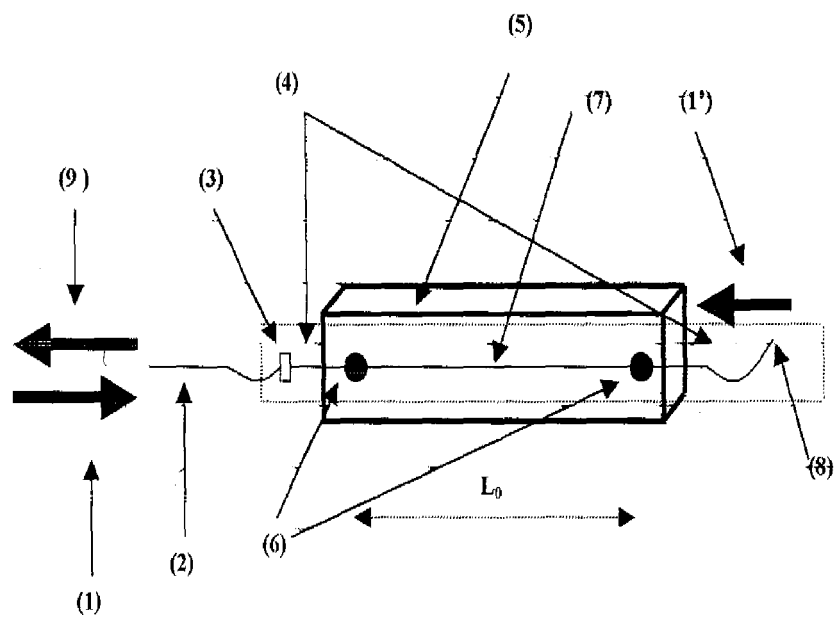


FIGURA 2



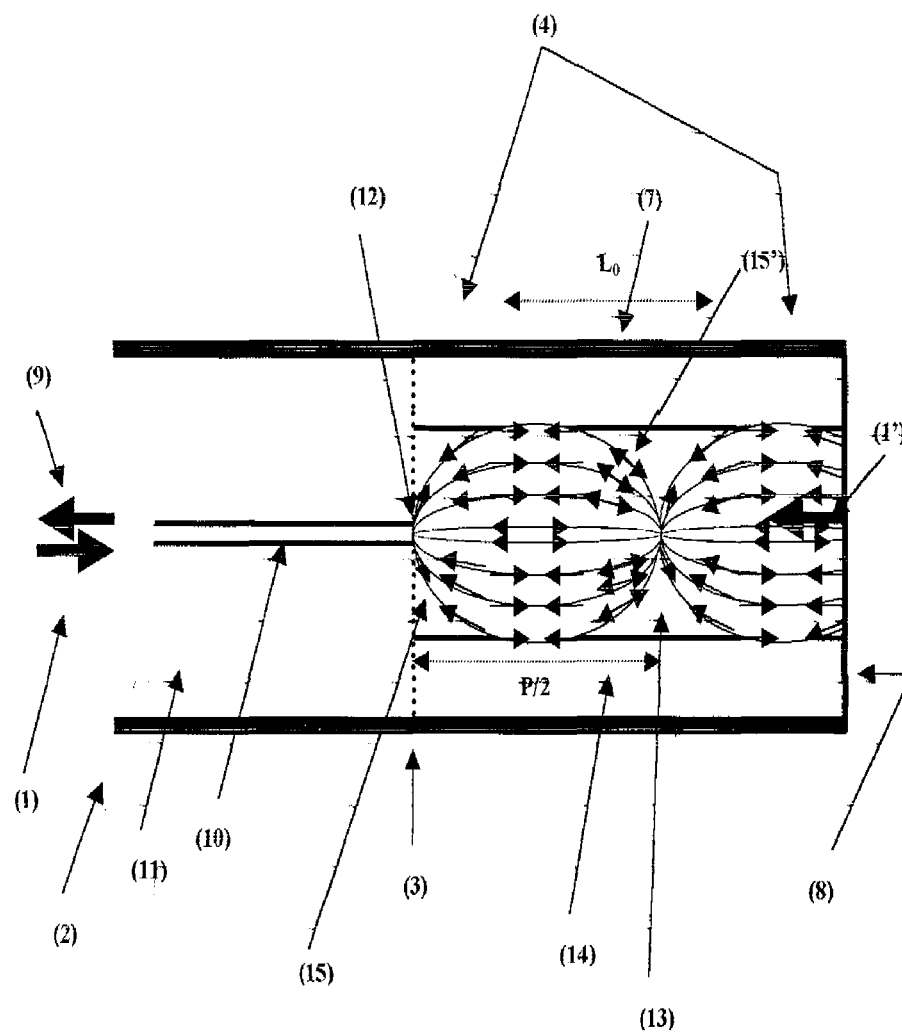


FIGURA 3

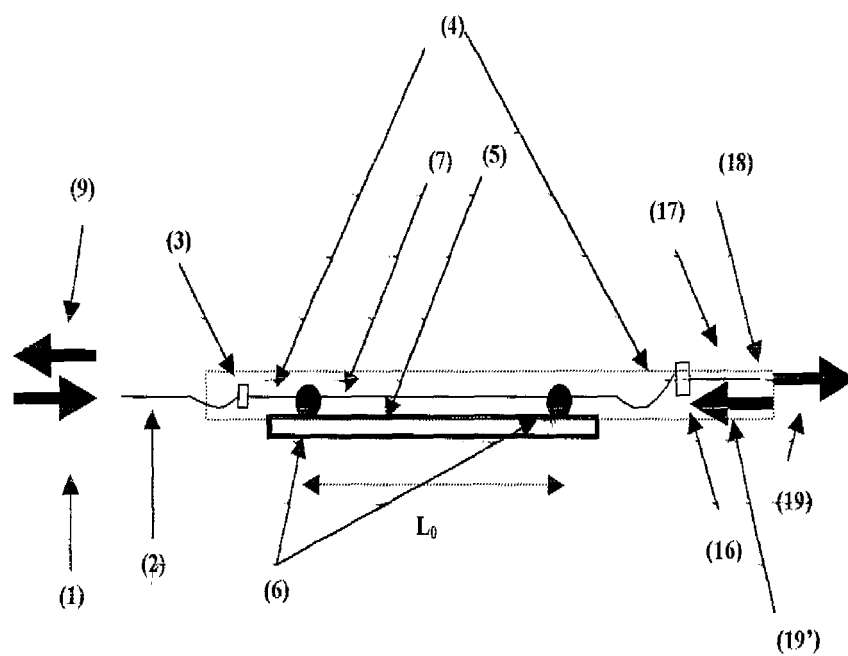


FIGURA 4

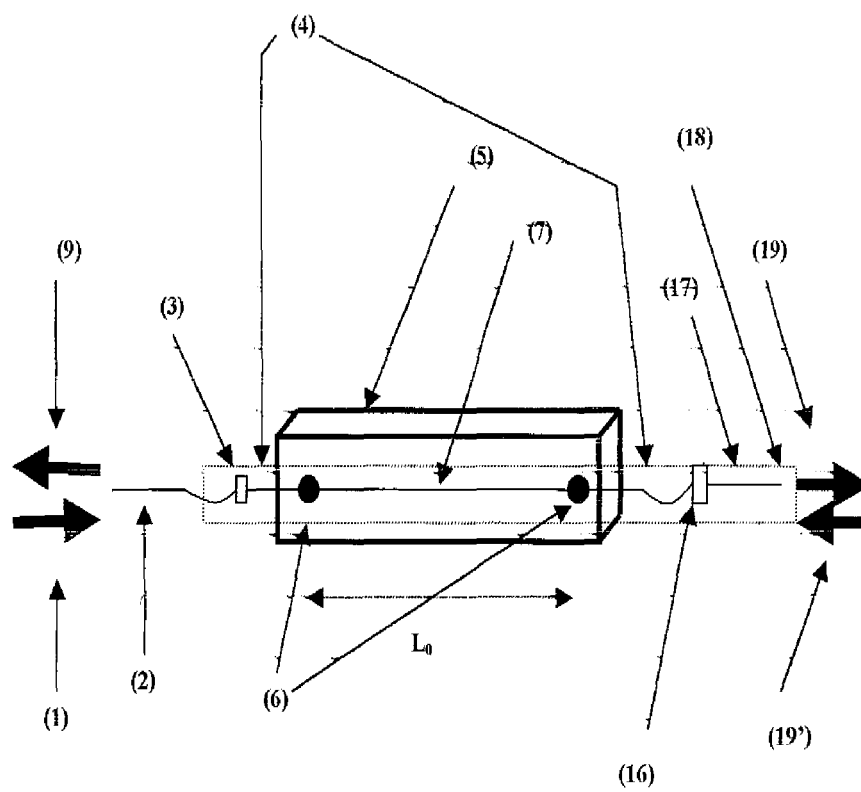


FIGURA 5

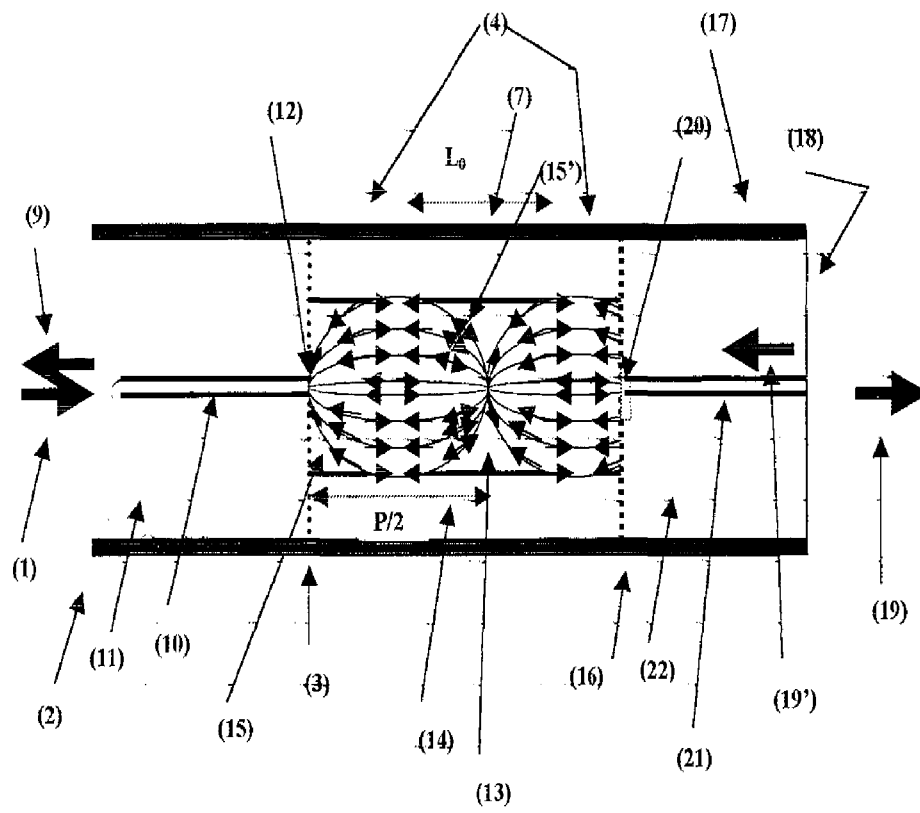


FIGURA 6

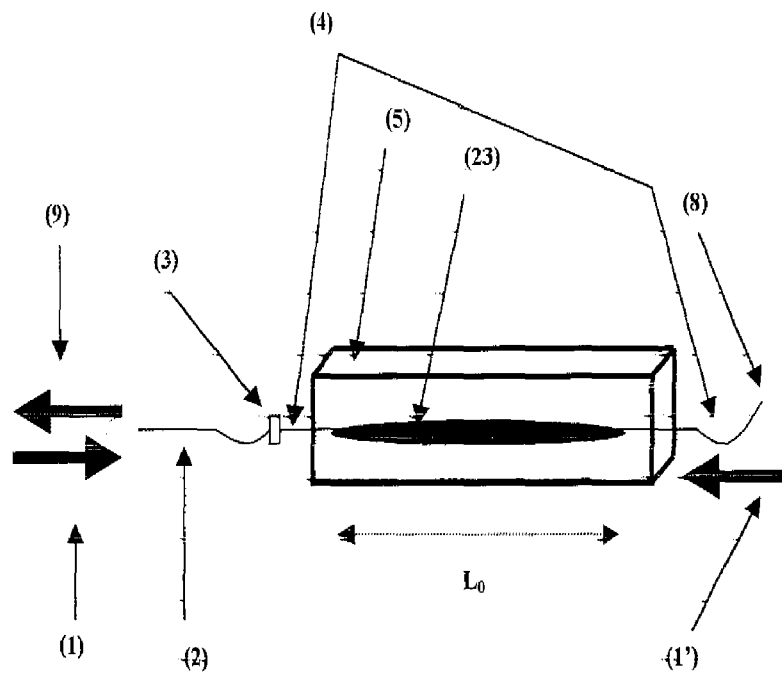


FIGURA 7

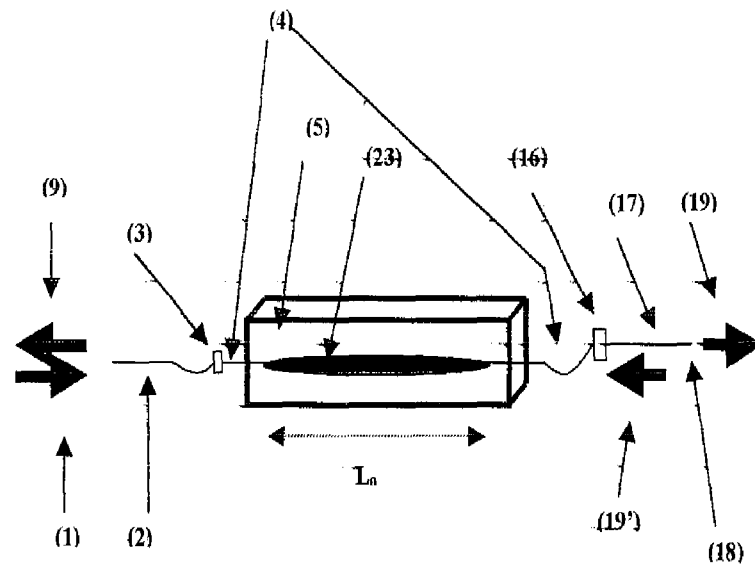


FIGURA 8

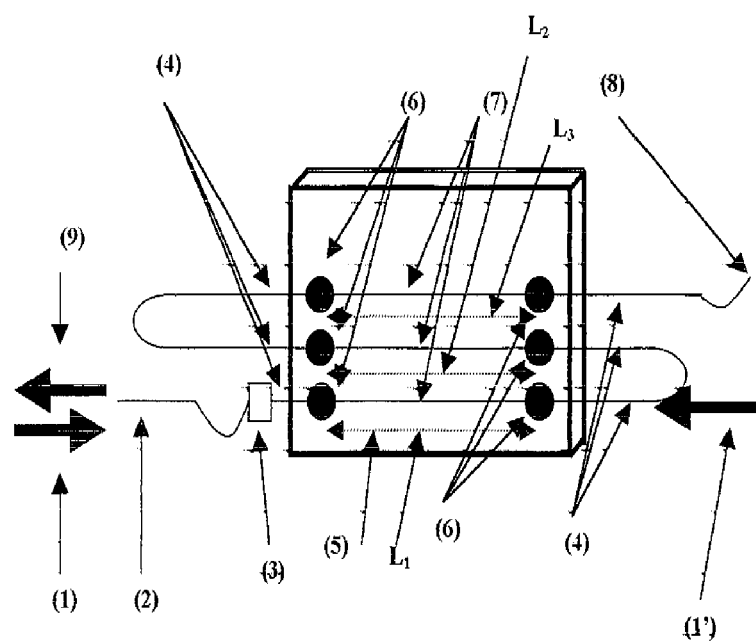


FIGURA 9

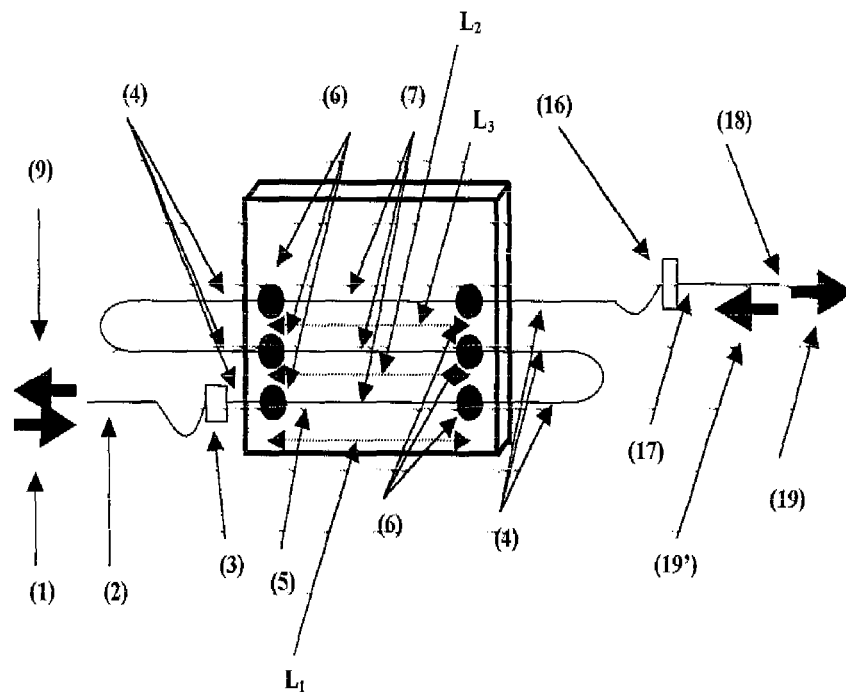


FIGURA 10



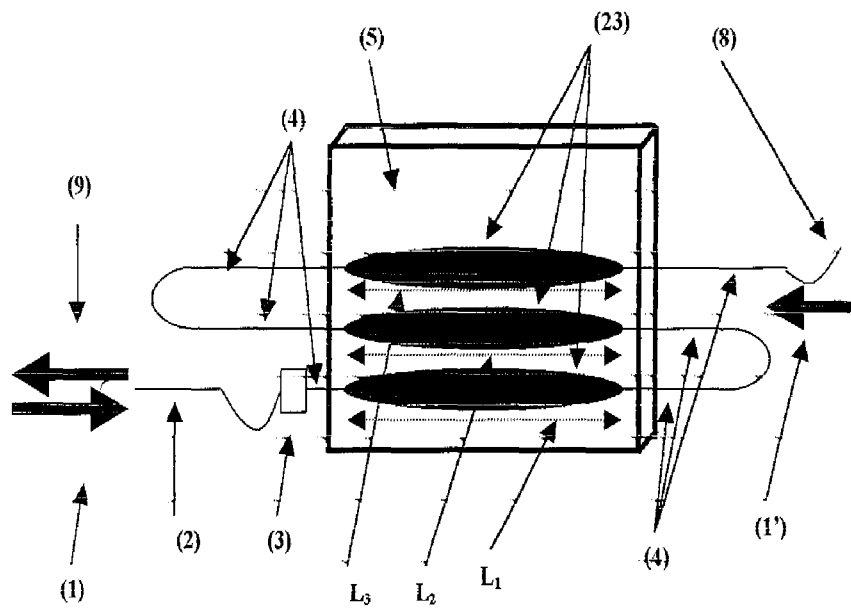


FIGURA 11

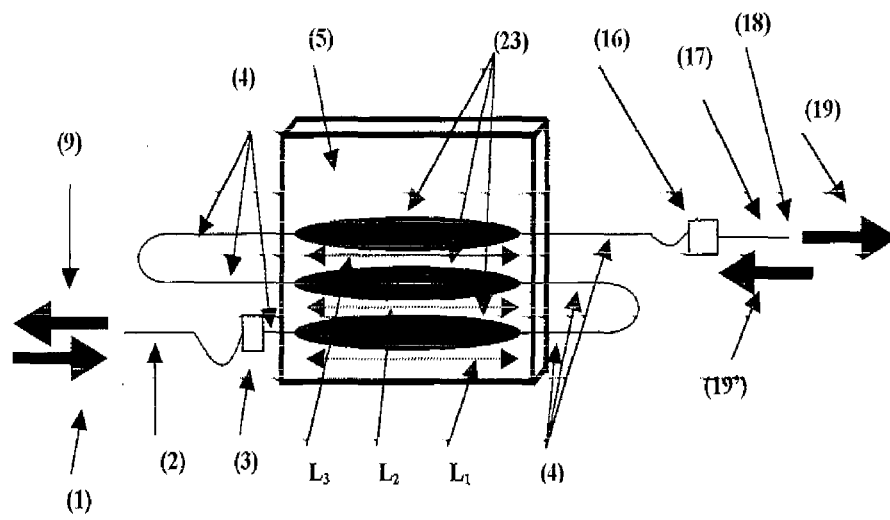


FIGURA 12

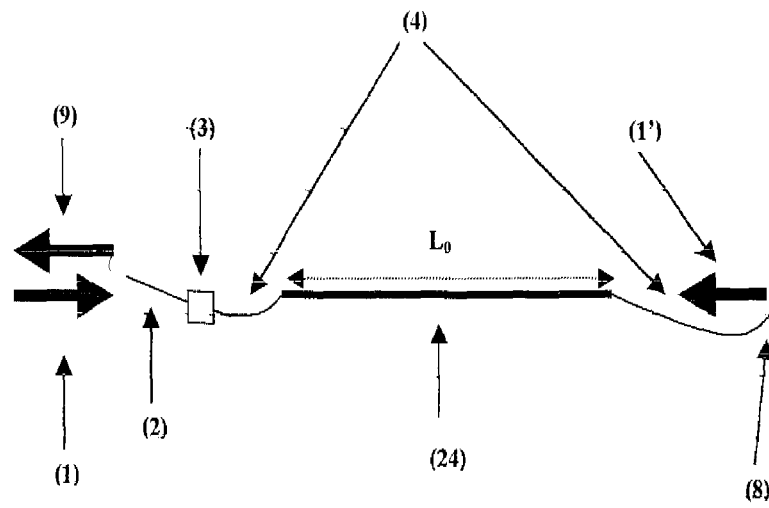


FIGURA 13

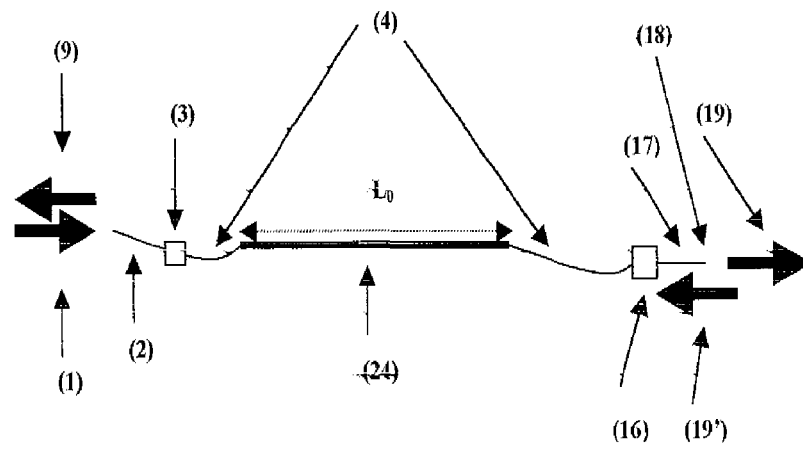


FIGURA 14

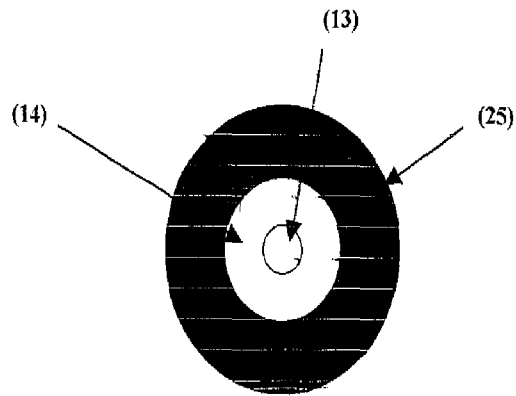


FIGURA 15

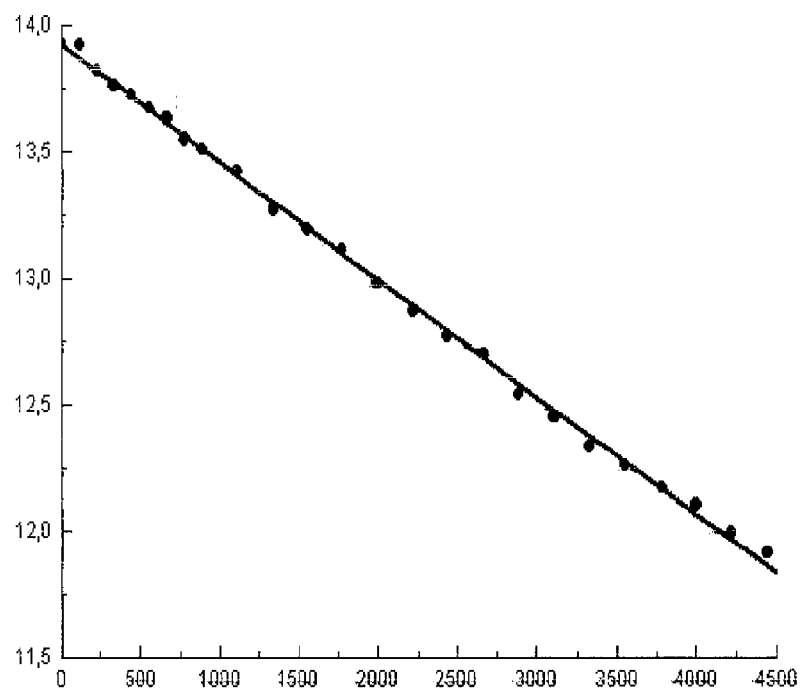


FIGURA 16

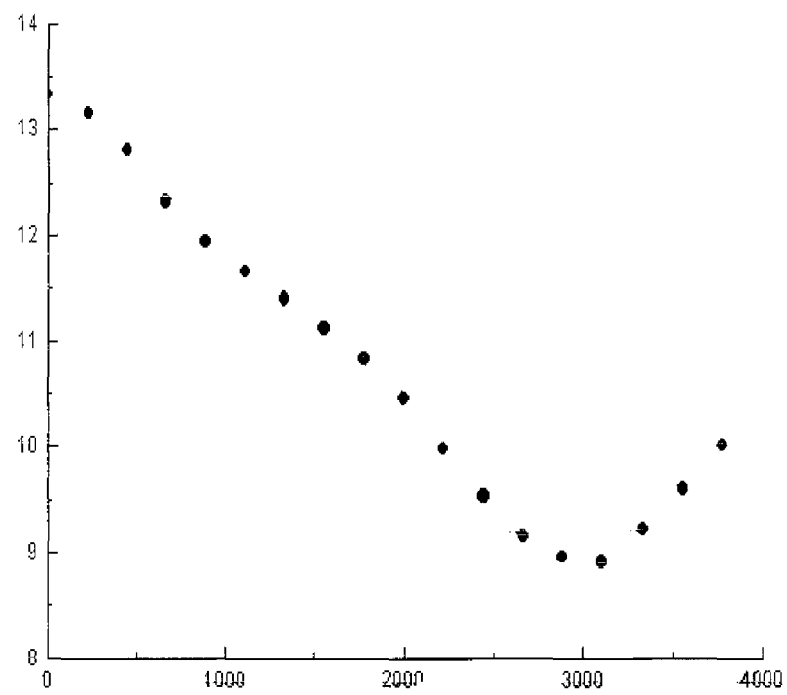


FIGURA 17

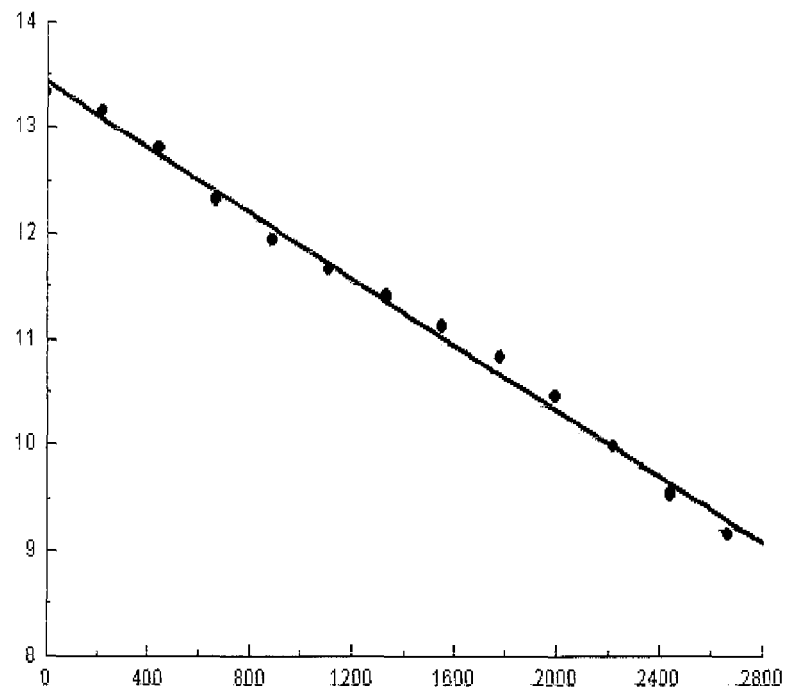


FIGURA 17a



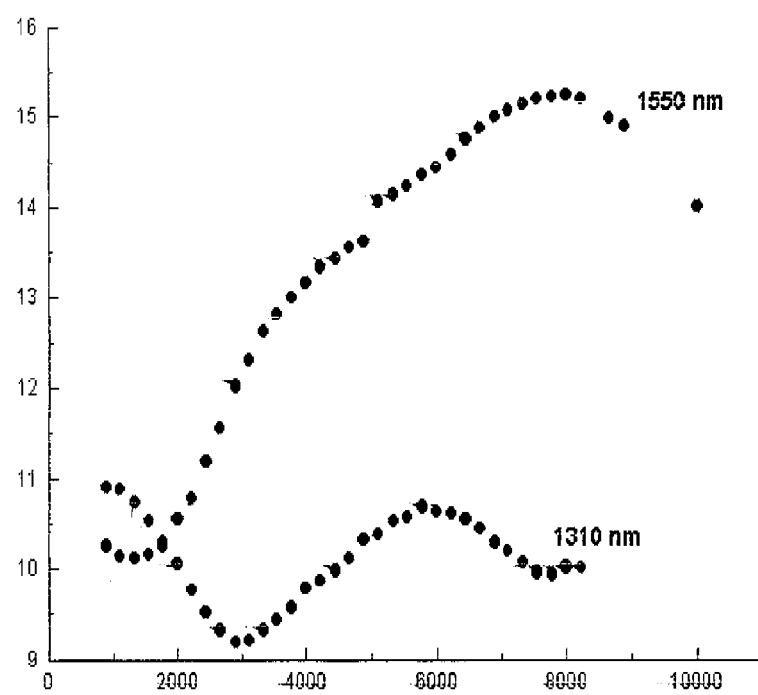


FIGURA 18

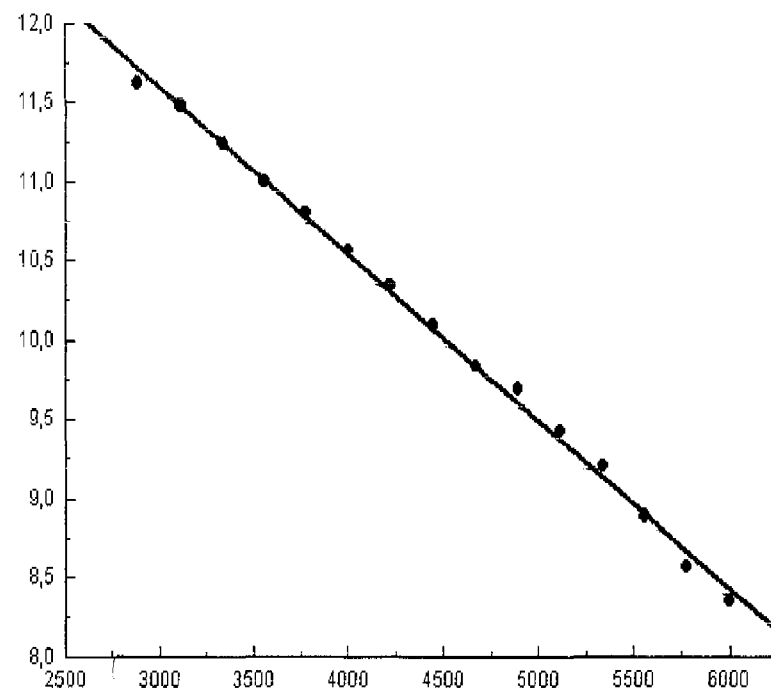


FIGURA 19

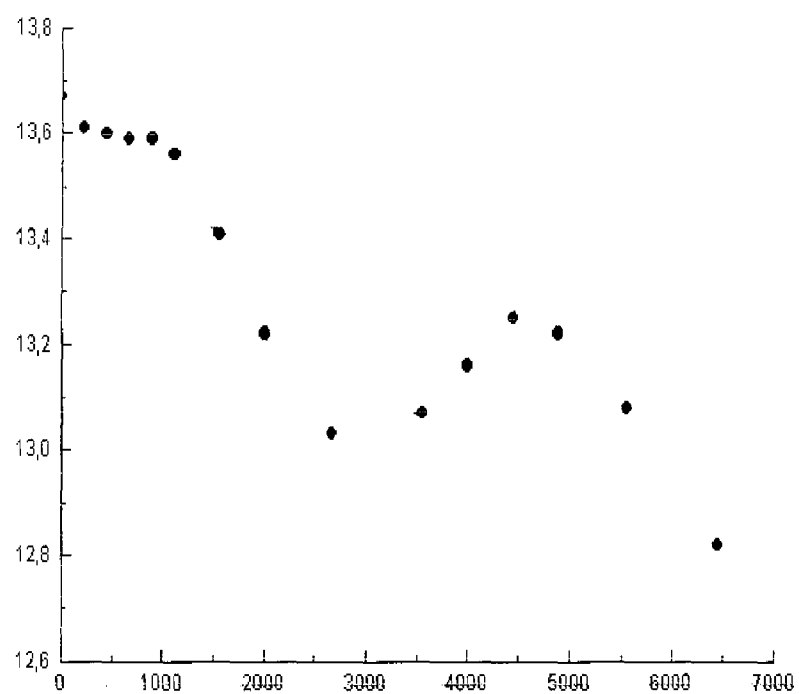


FIGURA 20

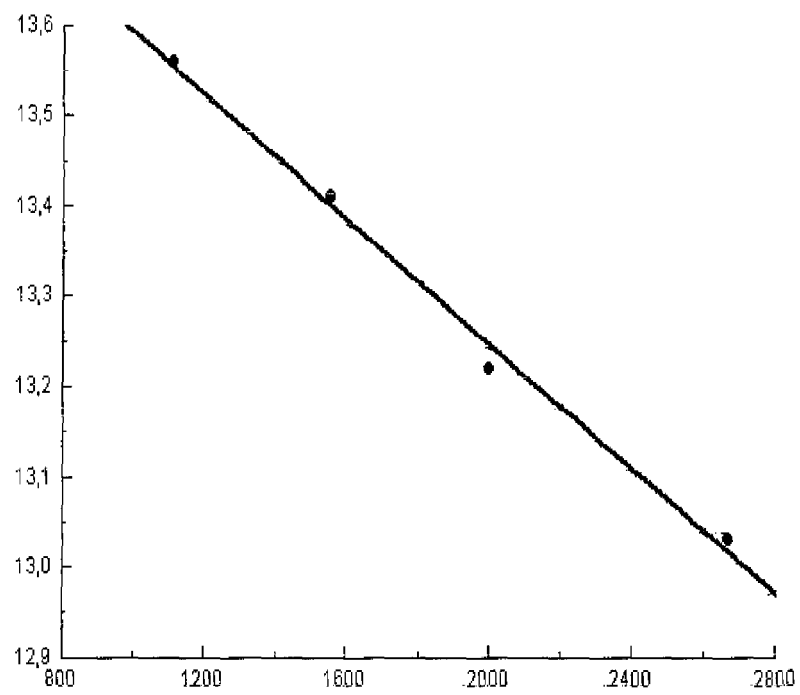


FIGURA 20a

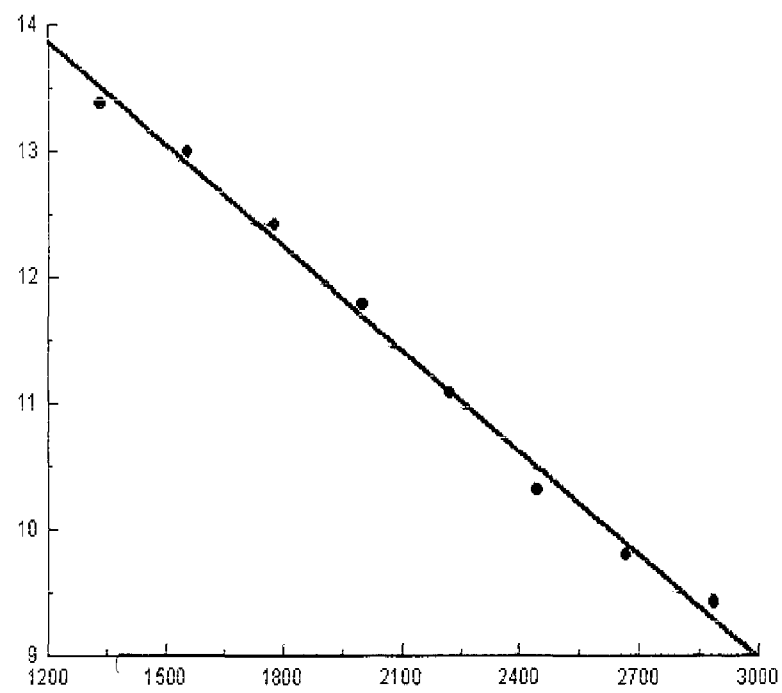


FIGURA 21

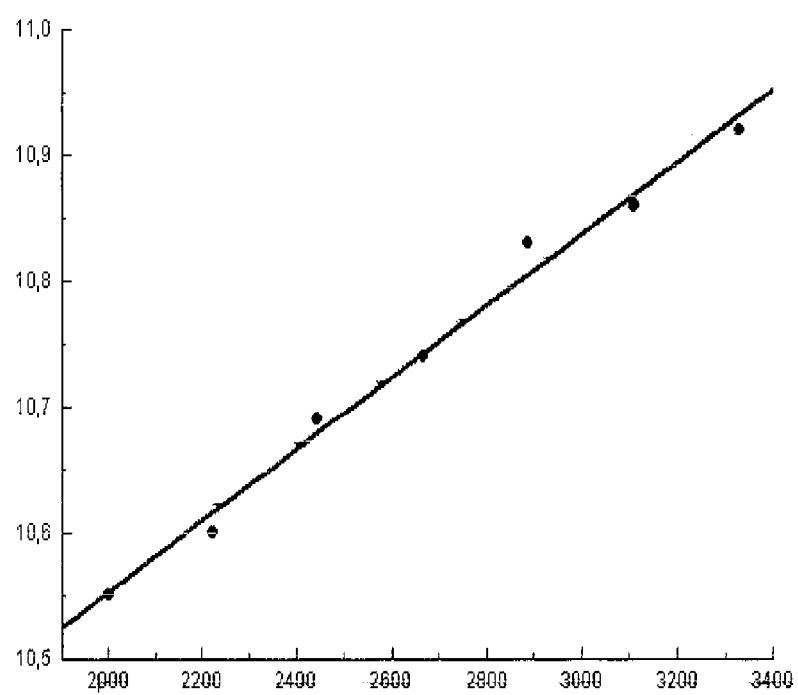


FIGURA 22

RESUMO

Patente de Invenção para "Sensor de variação de comprimento (*strain-gage*) baseado em fibras ópticas multimodo de perfil de índice de refração gradual"

- 5        Refere-se a presente invenção, a um dispositivo sensor a fibra óptica cujo objetivo é o de medir e monitorar pequenas variações de comprimento relativo, tipicamente no intervalo 0-5.000  $\mu$ e que são transmitidas por um substrato a um ou mais segmentos esticados de fibras ópticas multimodo de
- 10 perfil radial de índice de refração gradual parabólico, desta forma constituindo-se em um *strain-gage* a fibra óptica. Outras grandezas físicas que não sejam perturbações mecânicas como temperatura e campos elétricos/magnéticos podem também causar a referida variação de comprimento na fibra multimodo.
- 15 O mecanismo básico de funcionamento da invenção é baseado no efeito de lente com distância de focalização variável que uma fibra multimodo de índice gradual parabólico, por onde a luz se propaga, sofre ao ser esticada ou contraída, combinada com uma fibra óptica monomodo servindo simultaneamente como
- 20 injetora de luz e de filtro espacial para a luz que retorna por reflexão e/ou transmissão.